

量子信息技术发展与应用 研究报告

(2024年)

中国信息通信研究院

2024年12月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。

更名声明

原“集智”白皮书更名为“集智”蓝皮书。“集智”蓝皮书将继续秉承原有的编撰理念和高质量标准，致力于提供有价值的信息和洞见。



前 言

以量子计算、量子通信、量子精密测量为代表的量子信息技术是量子科技的重要组成部分，也是开辟未来产业新赛道、构建新质生产力，打造创新发展新动能的重要发展方向。量子信息领域基础研究与应用研究并重，进入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育相互带动，一体化发展阶段。

近年来，量子信息技术已成为全球主要国家在前沿科技领域布局的重点方向，政策规划布局和资金投入力度不断加大，三大领域基础研究、实验探索与技术创新高度活跃，科研亮点成果不断涌现，系统样机产品关键性能指标持续提升，应用场景探索在诸多行业领域广泛开展，企业数量增长和市场投融资保持较高水平，技术标准化研究取得阶段性成果，供应链和产业生态建设成为关注热点。我国高度重视量子信息领域发展，在政策布局、科研攻关、产品研发、示范应用和产业培育等方面，取得了一系列重要进展和成果。

自 2018 年起，中国信息通信研究院持续编写和年度发布《量子信息技术发展与应用研究报告》，成为管理部门和业界把握量子信息国内外发展动态和趋势的重要参考。本报告对近一年来全球量子信息领域的总体发展态势、最新技术研究与应用进展、行业热点问题等进行分析探讨，希望为凝聚业界发展共识合力持续做出贡献。

目 录

一、量子信息领域总体发展态势.....	1
(一) 量子信息技术开辟未来产业发展新赛道.....	1
(二) 量子信息科研探索与技术创新高度活跃.....	3
(三) 量子信息技术标准研究取得阶段性成果.....	6
(四) 企业数量增长放缓，投融资保持高水平.....	9
二、量子计算研究与应用进展.....	14
(一) 硬件系统多技术路线并行，科研亮点成果涌现.....	14
(二) 量子纠错研究备受关注，距离实用化仍有差距.....	18
(三) 软件与云平台多元开放发展，成熟度有待提升.....	21
(四) 多领域持续探索应用场景，欧美产业生态活跃.....	25
(五) 构建测评体系成为热点，支撑技术与产业发展.....	29
三、量子通信研究与应用进展.....	33
(一) 量子密钥分发科研持续推进，量子卫星受关注.....	33
(二) 量子信息网络是研究热点，多方推动前沿探索.....	36
(三) 量子保密通信应用持续探索，仍存在问题争议.....	40
(四) 抗量子加密标准正式发布，升级迁移逐步启动.....	43
四、量子精密测量研究与应用进展.....	47
(一) 新技术方案不断涌现，基础前沿研究亮点纷呈.....	47
(二) 欧美加大布局与投资力度，推动重点领域应用.....	50
(三) 光钟性能指标稳步提升，秒定义更新研究启动.....	54
(四) 产业生态构建初具雏形，规模商用仍面临挑战.....	58
五、量子信息领域发展与展望.....	60
附录：量子信息领域国际/国内技术标准.....	64

图 目 录

图 1 量子信息各领域 (a) 科研论文 (b) 专利申请年度变化趋势.....	4
图 2 量子信息各领域全球科研论文总量前十位国家.....	4
图 3 量子信息各领域全球科研论文总量前十位机构.....	5
图 4 量子信息各领域我国专利申请总量前十位省市.....	6
图 5 量子信息领域企业数量 (a) 领域分布 (b) 年度增长趋势.....	10
图 6 量子信息领域企业数量 (a) 国家分布 (b) 领域/区域对比.....	11
图 7 量子信息领域独角兽企业 (a) 国家分布 (b) 平均估值.....	12
图 8 量子信息领域企业投融资事件与金额年度变化趋势.....	13
图 9 量子计算主要技术路线核心指标发展趋势.....	15
图 10 量子计算软件技术体系框架.....	22
图 11 量子计算硬件性能基准测评指标体系.....	30
图 12 量子计算测评体系 1.0.....	32
图 13 新型协议 QKD 系统实验 (a) TF-QKD (b) CV-QKD.....	33
图 14 量子信息网络实验 (a) 城域三节点量子网络 (b) 量子存储器互联.....	39
图 15 美国 NIST 抗量子密码 (PQC) 标准化历程.....	44
图 16 量子精密测量主要技术方案与产品发展成熟度.....	48
图 17 秒定义更新路线图任务完成度.....	56

表 目 录

表 1 量子精密测量技术国防领域应用前景概况.....	52
表 2 ITU-T 量子信息领域国际标准.....	64
表 3 ISO/IEC 量子信息领域国际标准.....	65
表 4 ETSI 量子信息领域国际标准.....	65
表 5 TC578 量子信息领域国家标准.....	66
表 6 TC485 量子信息领域国家标准.....	66
表 7 CCSA 量子信息领域行业标准.....	67
表 8 CSTC 量子信息领域行业标准.....	67
表 9 DL/TC27 量子信息领域行业标准.....	67

一、量子信息领域总体发展态势

（一）量子信息技术开辟未来产业发展新赛道

量子信息技术是量子科技的重要组成部分，通过调控和观测亚原子尺度的微观物理系统，利用量子叠加、量子纠缠、量子隧穿等新颖量子物理学现象，实现信息的感知、计算和传输。量子信息技术主要包括量子计算、量子通信和量子精密测量三大领域，在提升计算复杂问题运算处理能力、加强信息安全保护能力、提高传感测量精度等方面，具备超越经典信息技术的潜力，有望带来改变游戏规则颠覆性创新，成为加快推动前沿科技领域探索、信息通信技术演进和数字经济产业发展的新引擎和加速器。

量子计算以量子比特为基本单元，利用量子叠加和干涉等原理实现并行计算，有望产生全新计算范式，在计算复杂问题中带来指数级加速优势，是未来计算能力跨越式发展的重要方向。当前，量子计算多种技术路线并行发展，原型机工程化研发进展迅速，应用场景探索广泛开展，产业生态初具雏形。基于量子纠错实现可支持大规模量子线路运行的逻辑量子比特，以及基于原型机在实际应用问题中实现量子计算加速和量子优越性应用，是下一阶段两个主要发展目标。

量子通信利用量子叠加态或纠缠效应，在经典通信辅助下实现密钥分发或量子信息传输，具有理论协议层面的可证明安全性。基于量子密钥分发（QKD）和量子随机数发生器（QRNG）等方案的

量子保密通信技术已进入实用化阶段，新型协议研究与系统实验持续开展，样机产品研发和平台服务探索不断推进，但实现规模化应用仍需推动产品和服务提质降本。基于量子隐形传态、量子存储中继和量子态转换等关键技术构建量子信息网络是未来重要发展方向，科研探索与试验验证高度活跃，但技术成熟度有限，实用化仍有很大差距。

量子精密测量对外界物理量变化导致的微观物理系统量子态变化进行调控和观测，实现高精度传感测量，精度、灵敏度和稳定性等核心指标比传统技术有数量级提升。量子精密测量包含多种技术方向和应用领域，技术成熟度与应用发展水平各异，其中微波原子钟、冷原子重力仪、光量子雷达、量子磁力仪等产品已实现商业化应用，光学原子钟、原子陀螺仪、里德堡原子天线等主要处于科研攻关和样机研制阶段。量子精密测量应用场景涉及国防军工、航空航天、生物医药、地质/资源勘测等众多领域，产业化前景广阔。

量子信息技术是开辟未来产业新赛道的重要发展方向。当前，量子信息领域已进入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育相互带动和一体化发展的关键阶段，加快核心技术攻关、推动科技成果转化、构建自主产业体系，是培育未来产业竞争力的核心。2024年政府工作报告¹提出：制定未来产业发展规划，开辟量子技术等新赛道，创建一批未来产业先导区。党的二十届三中全会审议通过《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》²提出：

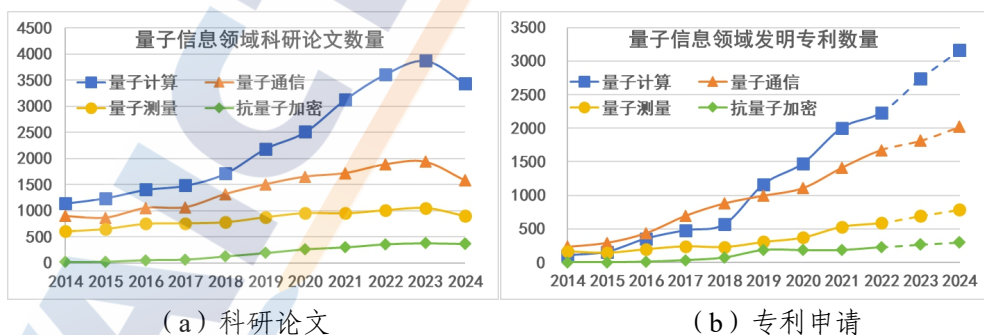
¹https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939153.htm

²https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm

完善推动量子科技等战略性新兴产业发展政策和治理体系，引导新兴产业健康有序发展。量子科技发展规划、细分领域发展布局和未来产业发展行动等政策体系进一步完善³。北京、安徽、广东、上海、湖北等省市通过布局科技研发项目、设立未来产业基金、支持新型研发机构、建设平台设施网络、孵化培育初创企业、提供产品服务采购等多类型举措，积极推动量子信息未来产业培育和生态建设先行先试。

（二）量子信息科研探索与技术创新高度活跃

量子信息科学研究和技术创新发展持续加速。量子计算、量子通信、量子精密测量三大领域已成为前沿科技领域热点方向，此外，由量子计算快速发展引发的密码破译威胁使得抗量子加密（PQC）逐步受到重视，PQC 已成为与量子信息密切相关的技术领域。中国信息通信研究院持续跟踪四大领域的科研与技术创新进展，统计分析相关数据信息为业界提供参考。近十年来，四大领域的科研论文和专利申请数量保持逐年递增态势，如图 1 所示。



(a) 科研论文

(b) 专利申请

来源：中国信息通信研究院整理（截至 2024 年 10 月）

³https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6929021.htm

图 1 量子信息各领域（a）科研论文（b）专利申请年度变化趋势⁴

科研论文方面，量子计算在量子信息各领域中研究关注度最高，论文数量增长最快，近三年来量子计算领域论文数量已超过其他领域总和。量子通信和量子精密测量领域论文小幅增长，PQC 领域在 2018 年之后论文增长加快，研究热度上升明显。专利申请方面，量子通信在 2018 年之前数量保持领先，主要得益于量子密钥分发等方向技术成熟度较高，量子计算自 2019 年起，专利数量增长迅速，在各领域中保持领先，技术创新持续活跃。PQC 领域 2018 年之后专利数量有数量级增长，业界关注度持续提升。



来源：中国信息通信研究院整理（截至 2024 年 10 月）

图 2 量子信息各领域全球科研论文总量前十位国家

量子信息各领域的全球科研论文总量前十位的国家统计如图 2

⁴ 科研论文统计基于 WOS 核心数据库检索，专利数量统计有滞后效应，近 2 年数据包含预测值。

所示。中、美、德三国在量子信息科研论文数量方面占据前列，在科研成果输出方面表现突出，日本、英国、印度、法国等国家也具备较强科研实力。量子计算领域，美国论文数量领先优势较为明显。量子通信领域，我国论文数量全球占比约为三分之一。量子精密测量和 PQC 领域各国论文数量差距相对不大，分布较为均衡。

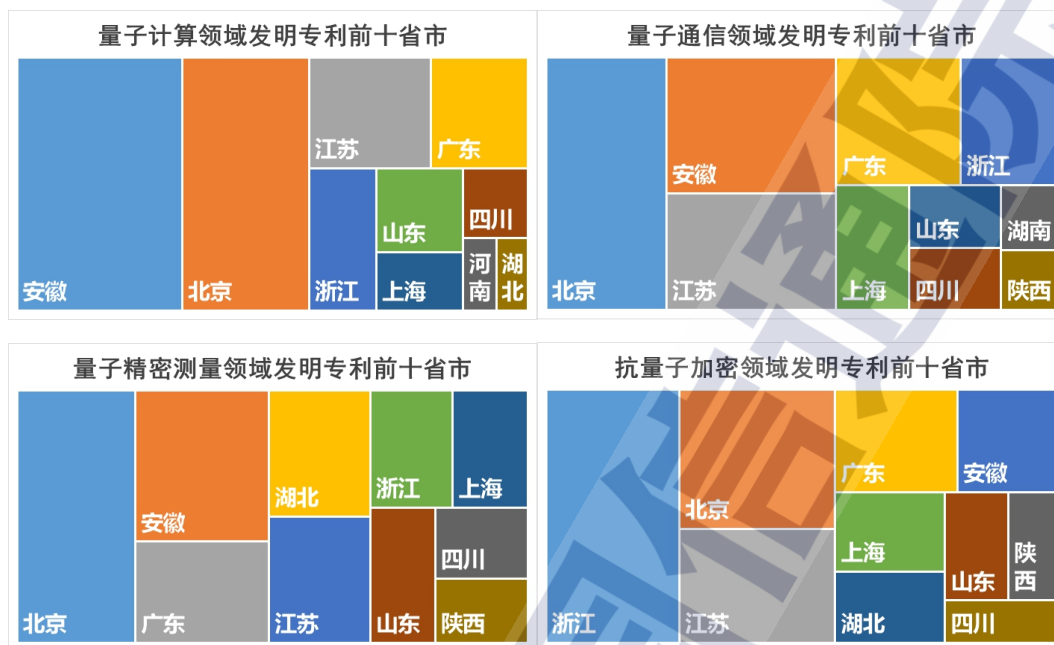


来源：中国信息通信研究院整理（截至 2024 年 10 月）

图 3 量子信息各领域全球科研论文总量前十位机构

量子信息各领域的全球科研论文总量前十位的机构统计如图 3 所示。中国科学院（含下属院所）、中科大、清华等研究机构 and 高校，是我国量子信息领域的代表性科研力量。美国能源部下属国家实验室、加州大学系统（含分校）、马里兰大学系统（含分校）、国家标准技术研究院（NIST）等机构是美国量子信息领域代表性科研力量。欧洲法国国家科学研究中心、瑞士联邦理工大学、马克斯·普

朗克学会、亥姆霍兹学会等机构也是量子信息领域的科研重镇。



来源：中国信息通信研究院整理（截至 2024 年 10 月）

图 4 量子信息各领域我国专利申请总量前十位省市

量子信息各领域我国专利申请总量前十位的省市统计如图 4 所示。北京、安徽、江苏、广东、浙江、湖北等地已成为量子信息领域技术创新高地。其中，安徽地区量子计算领域院校和企业聚集度较高，专利数量领先。量子通信和量子精密测量领域，北京专利数量领先，体现出科教资源优势。PQC 领域浙江企业专利布局较早。

（三）量子信息技术标准研究取得阶段性成果

标准对于量子信息科技成果转化、产品应用推广和产业生态建设具有重要作用。技术标准通过规范产品和应用的功能及性能一致性，保障安全性和互操作能力，可提升产业链分工合作水平与研发效率，降低系统成本，通过行业规范可增强企业市场竞争力和用户

认可度，引导和促进产业健康发展。量子信息技术标准化也是全球主要国家在发展战略布局中的关注重点之一。2024 年 7 月，美国白宫发布包含量子信息技术在内的《关键和新兴技术国家标准战略》实施路线图⁵，提出增加政府项目支持，加大标准化前期研究投入，提升利益相关者参与度，加强政府机构间和公私部门间沟通协调，开展标准化领导者和人才培养，加强与盟友国家合作，提升国际标准组织影响力，推动标准化评估与认证等战略目标和具体任务。

量子信息三大领域标准发展阶段与趋势各异。基于 QKD 系统和网络的量子保密通信方向技术与应用成熟度较高，标准化进展迅速，量子信息网络方向仍处于标准化前的研究讨论阶段。量子计算科研探索和原型机研制发展取得一定进展，处于开放探索和快速迭代阶段，技术与应用成熟度有限，当前标准化需求主要集中于统一术语定义、提供表征测试基准、研究系统和平台功能架构等初级阶段。量子精密测量技术路线和应用领域较为分散，且与传统计量、传感等应用行业领域关系密切，技术标准工作主要在各个行业领域分别开展。

近年来，随着量子信息三大领域的原型机研发、产品研制、应用场景探索、网络与服务平台建设部署等快速发展，技术标准研制成为业界关注热点。国际电信联盟电信标准化部门（ITU-T）、国际标准化组织与国际电工委员会（ISO/IEC）、欧洲电信标准化协会

⁵https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2024/07/USG-NSSCET_Implementation_Rdmap_v7_23.pdf

(ETSI) 等国际标准组织, 全国量子计算与测量标准化技术委员会 (TC578)、全国通信标准化技术委员会 (TC485) 等国家级标准委员会、中国通信标准化协会 (CCSA)、密码行业标准化技术委员会 (CSTC)、电力行业信息标准化技术委员会 (DL/TC27) 等行业标准组织, 纷纷开展了量子信息技术标准布局, 推动标准体系建设并取得阶段性成果。量子信息领域已发布的国际标准和国内标准统计见附录表 2~表 9。

国际标准方面, ITU-T 已成为量子通信领域的重要标准化平台, 在 QKD 网络架构、功能、接口、安全性等标准方面开展了大量研究, 已发布国际标准 32 项, 补编和技术报告 17 项, 在研项目 27 项, 同时积极开展量子信息网络标准化预研和国际标准化协调讨论, 中日韩是 ITU-T 量子通信标准研究的主要推动力量。ETSI 在 QKD 标准化方面长期耕耘, 集中了欧洲学术界和产业界代表性机构, 在 QKD 组件、系统、接口、应用等方面, 发布国际标准 16 项, 在研项目 13 项。ISO/IEC 已发布 2 项 QKD 安全性框架与测试国际标准, 1 项量子计算术语国际标准。2024 年 1 月, ISO/IEC 成立量子技术联合技术委员会 (JTC3)⁶, 由英国标准协会 (BSI) 担任秘书处, 韩国全州大学 Haeseong Lee 教授担任主席, 工作范围涉及量子信息技术(量子计算和量子模拟)、量子计量、量子源、量子探测器、量子通信和基础量子技术。目前 JTC3 设立 1 个战略规划顾问组和 6 个技术方向

⁶<https://www.iso.org/news/new-joint-committee-quantum-technologies>

特设组⁷，在研项目 1 项，未来可能成为量子信息国际标准化重要平台。

国家标准方面，TC578 负责量子计算和量子测量领域，目前已发布国家标准 8 项，其中量子计算领域 1 项，量子测量领域 7 项，在研国家标准项目 7 项，量子计算领域 4 项，量子测量领域 3 项。TC485 负责量子通信领域，目前已发布《量子保密通信应用基本要求》和《量子通信术语和定义》2 项国家标准，暂无新国家标准项目。

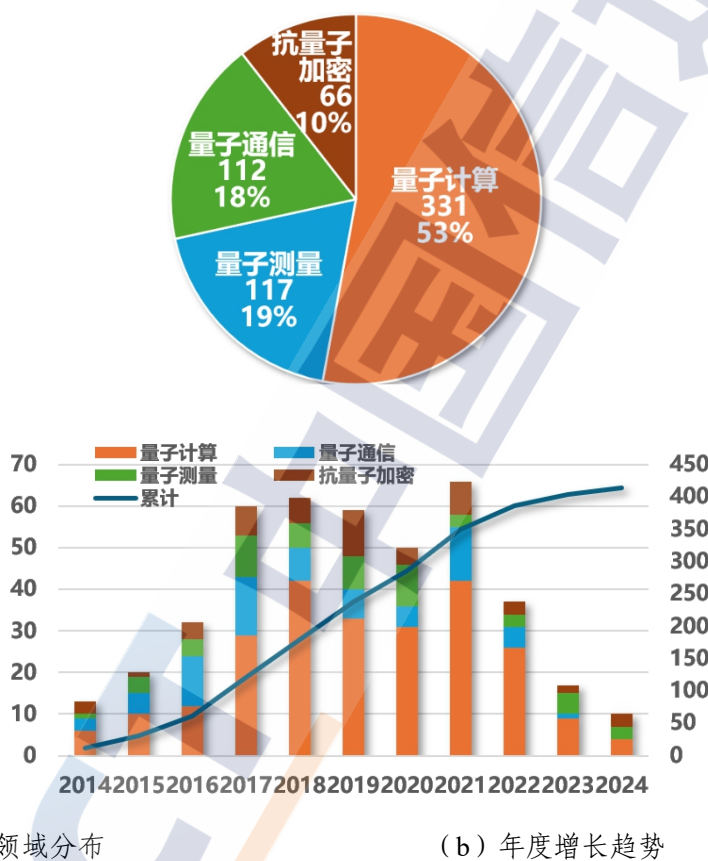
行业标准方面，CCSA 是我国量子通信行业标准研究主要平台，已发布量子保密通信行业标准 13 项，在研行业标准 24 项，协会标准 2 项，研究课题 37 项，初步构建了包含器件、系统、网络、应用和安全性等方面的量子保密通信技术标准体系，同时积极推动量子计算云平台 and 量子测量网络等量子信息网络相关标准研究。CSTC 从密码行业角度，制定发布了 2 项 QKD 相关行业标准。DL/TC27 基于电力通信领域量子保密通信示范应用实践，制定发布行业标准 1 项。

（四）企业数量增长放缓，投融资保持高水平

企业是量子信息领域的产业创新主体，在推动工程技术研发攻关、科技成果应用转化、产业生态体系构建等方面发挥重要作用。量子信息企业数量、分布和投融资情况，是观察量子信息技术产业发展态势的重要视角，报告对全球量子计算、量子通信、量子精密测量和 PQC 领域相关企业及其投融资情况进行统计分析，为业界提供参考。

⁷<https://www.iso.org/committee/10138914.html>

全球量子计算、量子通信、量子测量和 PQC 领域的企业数量及年度增长趋势如图 5 所示。全球量子信息领域相关企业数量超过 600 家，量子计算企业数量超 300 家，占比超过一半，量子通信和量子精密测量企业数量相近，均超百家，占比接近 20%，随着 PQC 标准发布和升级迁移进程启动，企业数量增长较快，已超过 60 家。



(a) 领域分布

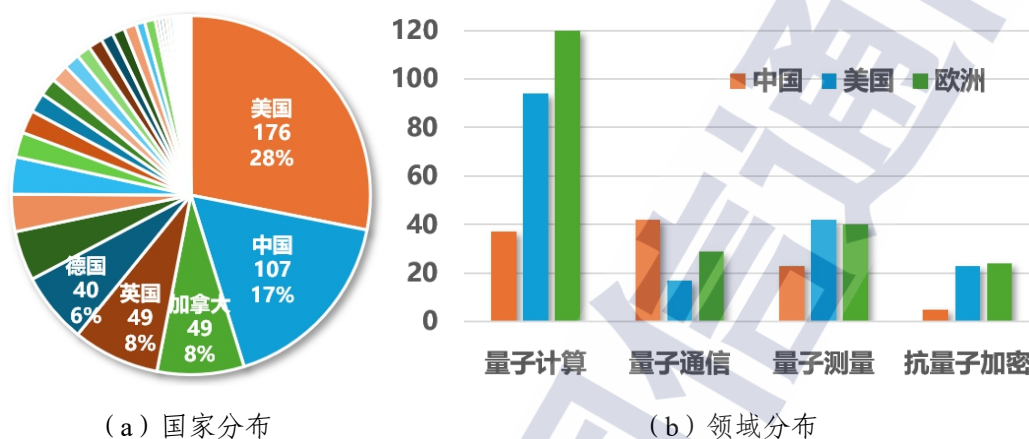
(b) 年度增长趋势

来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 10 月）

图 5 量子信息领域企业数量 (a) 领域分布 (b) 年度增长趋势

过去十年间，量子信息初创企业数量经历了一轮爆发式增长，近两年增速明显放缓。2017-2021 年是量子信息初创企业快速增长期，每年新增企业 50 余家，2021 年达到峰值，新增初创企业达 66 家。

2022 年起企业增速放缓的主要原因包括：全球经济不确定性和人工智能大模型爆发导致资金紧张，量子信息领域技术攻关和规模化应用仍面临挑战，高技术与人才门槛导致新企业玩家难以进入等。



(a) 国家分布

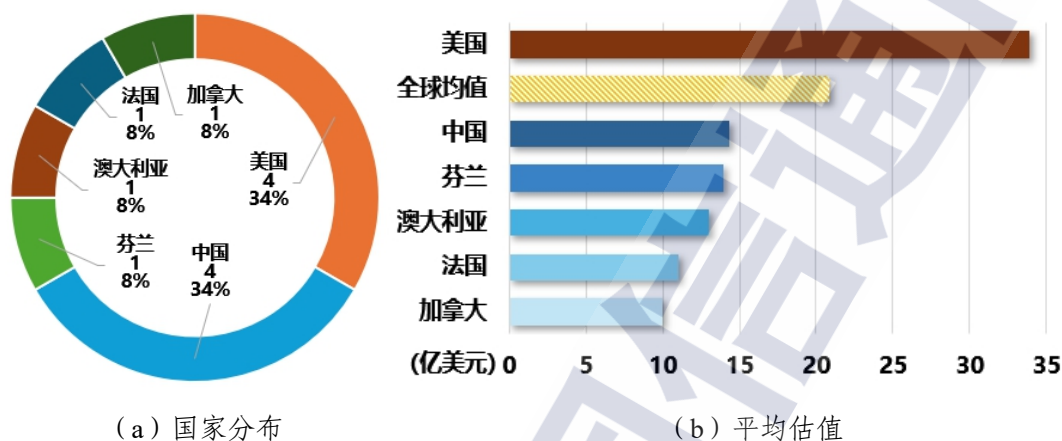
(b) 领域分布

来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 10 月）

图 6 量子信息领域企业数量 (a) 国家分布 (b) 领域/区域对比

全球量子信息四大领域企业数量及国家分布情况如图 6 所示。从国家分布看，美国量子信息企业 176 家，全球占比超四分之一，中国 107 家，数量位居第二，其他国家如加拿大、英国、德国、法国、日本、荷兰等也拥有较强企业竞争力。从领域分布看，量子计算领域欧美企业数量超过 200 家，全球占比接近三分之二，科技巨头和初创企业在数量规模和创新能力方面表现突出，产业生态高度集中。量子通信领域我国企业数量领先，全球占比超过三分之一，主要业务涉及量子保密通信产品研发、网络建设和示范应用等。量子精密测量领域全球企业数量超过百家，欧美企业数量相近，其中有大量国防、机械、电子等领域行业领军企业，我国量子精密测量

企业在数量规模和产业影响力等方面仍有一定差距。PQC 领域企业整体数量较少，大部分为 2016 年后成立的初创企业，欧美企业数量远超我国。



来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 10 月）

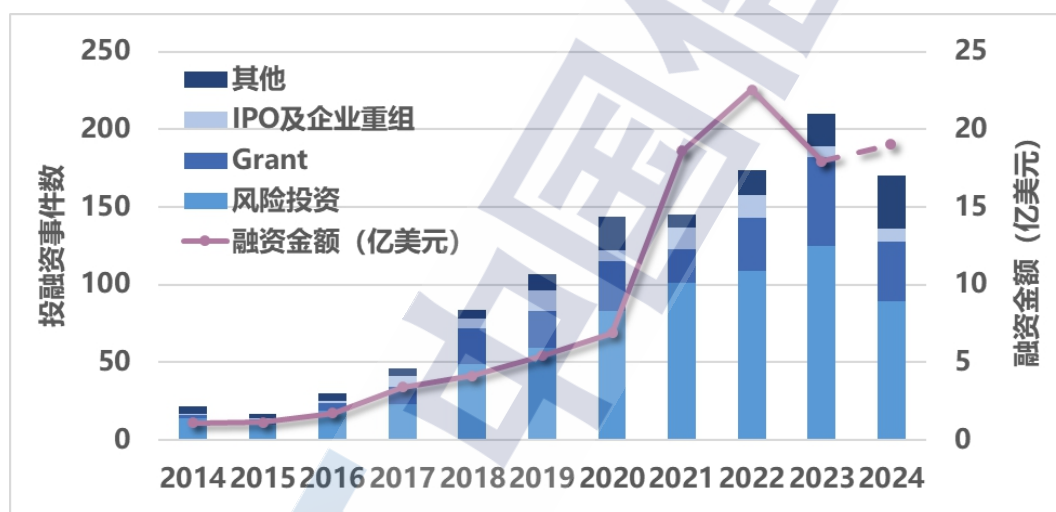
图 7 量子信息领域独角兽企业 (a) 国家分布 (b) 平均估值

独角兽企业⁸、准独角兽企业⁹、上市企业是企业创新能力和增长潜力的重要标志。根据多家机构榜单和估值数据综合评定，截至 2024 年 10 月，全球共有 12 家量子信息领域独角兽企业，如图 7 所示。从数量分布看，美国和中国各有 4 家，占比 67%，加拿大、澳大利亚、芬兰和法国各有一家。从估值水平看，全球量子独角兽企业总估值超过 200 亿美元，其中中美两国企业占据了超过 90% 份额。美国企业以总估值 135 亿美元位居首位，平均估值达到 34 亿美元，远高于全球均值的 21 亿美元。从领域分布看，10 家独角兽企业专注于量子计算，占比 80% 以上，量子通信和量子精密测量领域各有 1 家

⁸独角兽企业一般指成立不超过 10 年、估值超过 10 亿美元的未上市企业。

⁹准独角兽企业一般指成立不超过 10 年、估值超过 1 亿美元的未上市企业。

独角兽企业，90%的量子独角兽企业在 2016 年及之后成立。此外，量子信息领域还有 5 家准独角兽企业，全部集中在量子计算领域，美国企业 3 家，我国 1 家，西班牙 1 家。上市企业方面，全球有 11 家量子信息企业成功上市，平均市值 4.55 亿美元，9 家在 2020 年及之后上市。美国量子上市企业最多，共计 4 家，我国和加拿大各有 3 家，我国量子上市企业平均市值为 8 亿美元，高于美国企业的 5 亿美元。



来源：中国信息通信研究院（截至 2024 年 10 月）

图 8 量子信息领域企业投融资事件与金额年度变化趋势

全球量子信息企业投融资事件与金额年度变化趋势如图 8 所示。过去十年间，量子信息领域产业投融资超千笔，融资金额超百亿美元，在经历 2023 年的回落后，2024 年预计全年融资金额有望保持高水平，体现市场关注热度。从融资类型看，风险投资是最主要类型，共计 600 余笔，金额超 66 亿美元，合同赠予类数量较多，增长较快，

但整体金额较小。从国家分布看，美国量子企业融资超 300 笔，金额超 47 亿美元，全球占比近半。我国和加拿大量子企业各有约 80 笔融资，规模在 10 亿美元以上。从领域分布看，量子计算是吸金热点，累积融资超 78 亿美元，占比近八成，其次量子精密测量融资 12 亿美元，量子通信和 PQC 融资规模较小，合计约 8.3 亿美元。

二、量子计算研究与应用进展

（一）硬件系统多技术路线并行，科研亮点成果涌现

量子计算硬件保持超导、离子阱、中性原子、光量子、硅半导体等多种技术路线并行发展态势。其中，超导和硅半导体路线利用人造微观结构二能级系统实现量子比特，也称人造粒子，而离子阱、中性原子和光量子路线通过操控天然粒子物理状态构造量子比特。近年来，量子计算硬件科技攻关不断取得新进展，在比特数量、门保真度、退相干时间、量子体积等核心指标方面持续提升，如图 9 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 9 量子计算主要技术路线核心指标发展趋势

超导路线基于超导约瑟夫森结形成二能级系统，在系统扩展性、操控速度、集成电路工艺兼容等方面具有优势，近年来物理比特数量、逻辑门保真度等指标持续提升，仍是业界各方重点关注的“种子选手”。2023 年 12 月，IBM 发布 1121 位物理比特超导量子处理器 Condor 和 133 位物理比特超导量子处理器 Heron¹⁰。2024 年，芬兰 IQM 实现超导量子芯片 99.91%保真度 CZ 门，T1 和 T2 分别达到 0.964ms 和 1.155ms¹¹，成为超导样机新纪录。此外，超导量子比特的新构型设计也在持续探索。瑞士 Terra Quantum 提出原子级薄晶体结构的 Flowermon 超导量子比特¹²，有望提升相干时间，降低制造复杂度。IQM 与慕尼黑大学联合优化 Transmon 量子比特的参数设计，

¹⁰ <https://www.ibm.com/quantum/summit-2023>

¹¹ <https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/iqm-achieves-new-technology-milestones>

¹² <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.017003>

分析验证了电荷宇称切换效应¹³。合肥实验室研制 504 位物理比特超导量子计算芯片“骁鸿”¹⁴。本源量子上线 72 位物理比特芯片“悟空”¹⁵。

离子阱路线利用电荷与磁场间的相互作用力约束带电粒子，构建二能级系统，具有操控精度高、相干时间长、全连接性等优势，囚禁离子数量、逻辑门保真度等关键指标不断提升，**保持较强竞争力**。2024 年，美国 Quantinuum 离子阱原型机实现 99.9979% 和 99.914% 的单/双比特逻辑门保真度，量子体积 1,048,576¹⁶，进一步提升了样机性能。英国 Oxford Ionics 离子阱量子芯片单/双比特逻辑门保真度分别达到 99.9992% 和 99.97%¹⁷，成为业界新纪录。清华大学实现 512 离子二维阵列囚禁和 300 量子比特的量子模拟¹⁸。么正量子发布可稳定囚禁和冷却 108 个离子的高通光离子阱量子计算工程样机¹⁹。

中性原子路线利用光镊或光晶格捕获并囚禁原子，激光激发原子里德堡态实现逻辑门操作，在可扩展性、相干时间、操控精度等方面具有优势，比特规模扩展迅速，**成为业界“黑马”**。2023 年 12 月，哈佛大学在 280 位中性原子物理比特系统中，分别制备了 1 个

¹³ <https://doi.org/10.1038/s41534-024-00860-7>

¹⁴ https://www.cas.cn/cm/202404/t20240428_5012902.shtml

¹⁵ https://originqc.com.cn/zh/new_detail.html?newId=394

¹⁶

<https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-extends-its-significant-lead-in-quantum-computing-achieving-historic-milestones-for-hardware-fidelity-and-quantum-volume>

¹⁷ <https://www.oxionics.com/announcements/oxford-ionics-breaks-global-quantum-performance-records>

¹⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07459-0>

¹⁹ <https://tech.ifeng.com/c/8d3q2TQHx2t>

码距为 7，40 个码距为 3，以及 48 个码距为 2 的逻辑量子比特，是提升逻辑门操作精度的重要里程碑²⁰。2024 年，德国达姆施塔特工业大学实现 1305 个单原子量子比特阵列操控²¹。法国 Pasqal 在 2080 个陷阱位中成功捕获大约 1110 个原子²²。美国 Infleqion 基于静止中性原子实现了 99.902%和 99.35%的单/双量子比特门保真度²³。中科大成功构建求解费米子哈伯德模型的超冷原子量子模拟器“天元”，实验验证费米子哈伯德模型在含掺杂条件下的反铁磁相变²⁴。

光量子路线可利用多种光子自由度构建光量子比特，可支持室温工作、相干时间长、操控简单，包含逻辑门型光量子计算和专用光量子计算两类，前者朝通用量子计算发展，后者面向组合优化等问题求解应用。2024 年，荷兰 QuiX Quantum 在光量子芯片上演示 GHZ 态生成，展示了基于集成光子（PIC）技术实现大规模可扩展光量子计算的前景²⁵，推出基于 Alqor 光量子处理器的 Bia 量子计算云服务²⁶。玻色量子发布 550 位光量子相干伊辛机 550W²⁷。

硅半导体路线控制硅基衬底量子点中束缚电子或原子核的自旋量子态构建量子比特，具有与现代半导体先进制程工艺兼容等优势。2024 年，Intel 研发硅半导体量子芯片新型制造与测试工艺，在自旋

²⁰ <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06927-3>

²¹ <https://doi.org/10.1364/OPTICA.513551>

²² <https://www.pasqal.com/news/pasqal-exceeds-1000-atoms-in-quantum-processor/>

²³ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.08288>

²⁴ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07689-2>

²⁵

<https://www.quixquantum.com/news/quix-quantum-technology-unlocks-key-to-scaling-photonic-quantum-computing>

²⁶ <https://www.quixquantum.com/news/bia-launch>

²⁷ <https://www.qboson.com/newsDetail?id=233>

量子比特中实现栅极保真度 99.9%²⁸。日本理化研究所基于硅量子点电子自旋间的自旋封锁现象，实现了量子比特的高速高精度读出²⁹。澳大利亚 Diraq 在 SiMOS 量子点平台实现超 99%保真度双量子比特逻辑门操作³⁰。中科大在半导体量子点中实现量子干涉与相干俘获，并验证了驱动电场对量子相干俘获的暗态调控和奇偶效应³¹。

总体而言，量子计算硬件技术路线竞争尚无融合收敛趋势。各类原型机的关键性能指标水平距离大规模通用量子计算要求仍有很大差距。未来需要在提升量子比特规模的同时，实现量子纠错和高精度逻辑门操控，仍需学术界和产业界持续开展协同攻关。

（二）量子纠错研究备受关注，距离实用化仍有差距

量子纠错是保护量子比特免受环境噪声和自身退相干效应影响，提升逻辑门保真度，最终实现大规模可容错通用量子计算的必要环节。量子纠错借鉴了传统信息通信领域纠错编码理念，一般通过使用冗余量子比特构建高维状态空间，检测和纠正其中所含的目标量子比特和逻辑门操作的错误并消除其影响。冗余量子比特也称量子纠错编码，较于传统纠错方案，量子纠错实现难度更大，主要原因包括执行量子纠错的过程还会不可避免地引入新的错误，量子纠错码无法利用简单的复制操作来增加冗余度等。自上世纪九十年以来，业界已提出和发展了多种量子纠错编码方案，其中表面码和颜

²⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07275-6>

²⁹ https://q-portal.riken.jp/topic_detail?topic_id=T20240084&lang=ja

³⁰ <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02614-w>

³¹ <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c01781>

色码等量子纠错方案在近年来逐步成为业界开展研究与实验验证的关注热点。

量子计算硬件能力提升为量子纠错研究与实验验证提供了有力支持。谷歌等 13 家机构联合团队提出³²由 101 个量子比特组成、码距为 7 的表面码，实验实现 $(0.143 \pm 0.003)\%$ 的量子比特错误率，越过盈亏平衡点，成为量子纠错实验重要里程碑。微软与 Quantinuum 合作³³在 56 比特 H2 离子阱量子计算机中实现了错误率为 0.0011 的 12 位逻辑量子比特，相较于物理量子比特 0.024 错误率，性能提升 22 倍。Quantinuum 联合团队³⁴利用 30 个物理量子比特构建 4 个逻辑量子比特，逻辑量子比特纠缠错误率降至 10^{-5} ，相较物理量子比特 8×10^{-3} 错误率降低近 800 倍。马里兰大学报道³⁵基于 Quantinuum H2 离子阱量子计算机实验验证了四维表面码单次量子纠错的可行性。

新型量子纠错编码方案设计与实验验证取得诸多重要进展。

2024 年，IBM 提出基于量子低密度奇偶校验码的纠错方案³⁶，实现了 0.7% 误差阈值，当错误率为 0.1% 时，可使用 288 个物理量子比特保护 12 个逻辑量子比特。此外，IBM 提出基于动态量子电路生成具有高保真度“魔法态”方法³⁷，有望大幅提升量子比特保真度。法国 Alice&Bob 公司提出基于玻色子猫态量子比特和量子低密度奇偶校

³² <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.13687>

³³ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.04628>

³⁴ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.02280>

³⁵ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.08865>

³⁶ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07107-7>

³⁷ <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06846-3>

验码的新型纠错编码方案³⁸，基于 1500 个物理量子比特编码实现错误率 $<10^{-8}$ 的 100 个逻辑量子比特。日本理化学研究所提出“多-超立方码”量子纠错方案³⁹，基于复杂几何结构实现 30%编码效率和并行处理能力。清华大学等联合团队提出玻色编码纠错方案，实现纠缠逻辑量子比特相干时间提高 45%，首次利用逻辑量子比特实验证明贝尔不等式⁴⁰。

当前，量子纠错仍处于技术方案开放探索和原理性实验验证阶段。虽然部分量子纠错编码方案和实验演示，已在量子比特相干时间和逻辑门错误率等关键指标方面有很大提升，也宣称实现逻辑量子比特。但需要指出的是，逻辑量子比特目前业界尚无准确定义和表征方式，通常可指能够长时间保持相干性，以极低的逻辑门操作错误率，例如 10^{-12} 以下，支持大规模量子线路操作的能力。如果以此要求衡量，目前各类实验中的逻辑量子比特，大多是实现了相对物理量子比特的错误率降低，或多轮纠错的正向增益，即突破盈亏平衡点，但距离达到长相干时间和极低错误率等实用化要求还相去甚远。

基于量子纠错实现实用化逻辑量子比特将是下一个重大里程碑。增加硬件系统中可参与纠错编码的物理比特规模或可操控维度，同时提升纠错操作过程保真度和实时解码能力与速度，是实现实用化量子纠错过程中面临的主要技术挑战。此外，探索分布式的量子纠

³⁸ <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.09541>

³⁹ <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp6388>

⁴⁰ <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02446-8>

错编码技术方案和实现架构，实现多种不同量子纠错编码的协同转换，构建以硬件资源利用率、纠错操作效率等指标为表征的量子纠错性能评价体系等，也是未来量子纠错领域研究和发展的方向。

（三）软件与云平台多元开放发展，成熟度有待提升

量子计算软件是连接量子计算机与用户的桥梁，通过对应用场景中的计算复杂问题进行建模和抽象，适配并运行量子算法，执行编译优化形成量子计算机的控制与读取信号，与硬件系统协同完成计算任务。此外，面向超导等技术路线的量子芯片电子设计自动化（EDA）软件，以及调度量子计算任务与硬件资源、实现异构/多源算力融合的管理软件，也是量子计算软件的重要组成部分。近年来，随着量子计算原型机研发不断发展迭代，量子计算软件研究也在业界持续开放探索，软件技术体系初步形成，如图 10 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 10 量子计算软件技术体系框架

量子计算应用软件提供构建和操作量子程序的工具集，诸如开发组件、调试优化工具和应用算法包等，支持开发者设计和执行量子计算任务并获得运算结果。2024 年，美国 Quantinuum 发布量子自然语言处理软件 lambeq 0.4.0 版本，提高可用性以及字符串图处理速度⁴¹。微软 Azure Quantum Elements 软件推出生成化学和密度泛函理论加速等功能，用于化学和材料科学研究与应用场景开发⁴²。玻色量子上线开物量子开发者社区⁴³，助力量子计算应用软件开发和商业场景探索。量子计算编译软件在规范量子编程流程同时可用于编译和执行量子程序，同时提供编译规则用以协调和约束编译操作。IBM 发布更新版 Qiskit 软件，进一步提高量子硬件电路优化速度和存储资源占用量等性能⁴⁴。Intel 推出量子软件开发工具包(Quantum SDK) 1.1 版本⁴⁵。量子计算测控软件用于控制和处理硬件，执行运算操作并读取结果，支持测量结果反馈、芯片校准和量子纠错等功能。是德科技已在其量子控制系统中集成了 Q-CTRL 公司 Boulder Opal 软件的硬件优化和自动化功能，提供量子处理器表征和优化功能⁴⁶。QuantroIOx 公司推出量子比特自动化控制软件 Quantum Edge，支持

⁴¹ <https://www.quantinuum.com/qai/lambeq>

⁴² <https://quantum.microsoft.com/en-us/quantum-elements/product-overview>

⁴³ <https://kaiwu.qboson.com/>

⁴⁴ <https://newsroom.ibm.com/2024-05-15-IBM-Expands-Qiskit,-Worlds-Most-Performant-Quantum-Software>

⁴⁵ <https://www.intel.cn/content/www/cn/zh/content-details/816508/intel-quantum-sdk.html>

⁴⁶

<https://www.businesswire.com/news/home/20240313371338/en/Keysight-and-Q-CTRL-Team-Up-to-Accelerate-Infrastructure-Quantum-Software>

量子芯片监测与控制自动化⁴⁷。量子计算 EDA 软件可提供量子计算芯片的电路设计、布局优化、仿真验证、校准测试等功能。是德科技推出面向超导量子处理器设计的 EDA 仿真工具 QuantumPro，实现电路原理图设计、布局、分析、仿真以及量子参数提取等功能⁴⁸。量子计算管理软件用于提供计算资源与任务监控、管理和调度功能，同时实现量子与经典等多源异构算力协同。微软将 Azure Quantum 资源估算器开源，可用于估算运行量子程序所需的计算资源⁴⁹。英伟达发布 CUDA-Q 开源平台，提供量子-经典混合编程工具，推动量子计算应用案例研究探索⁵⁰。

总体而言，量子计算软件仍处于百花齐放、百家争鸣的初级阶段。欧美企业技术迭代快、成果发布多，在开源社区影响力和用户生态等方面占据领先优势。由于量子计算硬件技术成熟度不足，量子编译、测控和管理等软件系统仍需与硬件发展同步探索升级。量子算法研究和应用场景探索也将对应用、编译等软件发展产生影响。未来，推动量子计算编译工具、SDK、中间表示等技术路线无关的通用基础软件持续提升技术成熟度和易用性，将是业界发展重要方向。

量子计算云平台已成为融合软硬件能力，支撑应用探索与生态培育的核心汇聚点。通过远程接入方式为用户提供便捷的量子计算

⁴⁷ <https://quantrolox.com/quantum-edge/>

⁴⁸

<https://www.keysight.com/cn/zh/about/newsroom/news-releases/2024/0227-pr24-036-keysight-introduces-quantumpro-delivering--first-i.html>

⁴⁹ <https://learn.microsoft.com/zh-cn/azure/quantum/intro-to-resource-estimation>

⁵⁰ <https://developer.nvidia.com/cuda-q>

硬件资源访问功能与算力服务，云平台有望成为未来量子计算商业化落地重要模式。近年来，国内外科技企业、初创企业、研究机构纷纷推出了量子计算云平台服务。

量子计算领域科技企业、初创企业和研究机构等，通过自研、采购和接入集成等多种方式，构建量子计算云平台，探索量子-经典计算融合架构与服务。2023 年 12 月，IBM Quantum 云平台集成 Q-CTRL 公司错误抑制技术软件 Q-CTRL Embedded⁵¹，将量子算法可执行复杂性和成功率分别提升 10 倍和 1000 倍⁵²。2024 年，Amazon Braket 云平台推出 Braket Direct 计划，为开发者提供指定时间段保留特定量子处理器使用权且无需排队功能。奥地利 AQT 与德国电信合作提供其量子计算机的云端访问功能⁵³。中科院量子信息与量子科技创新研究院研制并交付 504 比特量子计算芯片“骁鸿”⁵⁴，支持大规模量子计算测控系统研究和云平台服务。北京量子院联合中科院物理所发布 Quafu 量子云平台，提供百比特规模超导量子计算资源服务⁵⁵。移动云与量子科技长三角产业创新中心、中科院物理所、玻色量子 and 启科量子等企业和机构合作，推出了五岳量子计算云平台⁵⁶。

量子计算云平台实现商业化服务能力需进一步提升软硬件水平。虽然国内外业界已有诸多量子计算云平台建设与服务实践探索，但

⁵¹ <https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-integrates-its-error-suppression-technology-into-ibm-quantum-services>

⁵² <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.20.024034>

⁵³ <https://www.telecoms.com/enterprise-telecoms/deutsche-telekom-strikes-yet-another-quantum-computing-deal>

⁵⁴ https://www.cas.cn/cm/202404/t20240428_5012902.shtml

⁵⁵ <https://quafu.bajis.ac.cn>

⁵⁶ https://ecloud.10086.cn/api/page/wyqcloud/web/console/#/overview_home

需要指出的是，当前量子计算云平台的各类型硬件资源在物理量子比特规模、逻辑门保真度、可执行量子线路层数等核心指标方面，距离解决实用化计算复杂问题的规模与精度要求还有较大差距，主要面向科普教育、算法研究、应用案例原理验证等场景提供免费服务，商业化模式尚未完全成熟。未来，打造量子计算云平台商业价值的核心在于提升量子计算机硬件能力，在实用化问题中实现问题求解加速或量子优越性，才能形成量子计算云平台和服务的商业逻辑闭环，真正实现量子计算系统的算力输出与服务能力。

（四）多领域持续探索应用场景，欧美产业生态活跃

基于量子计算样机进行实用化问题应用探索在国内外广泛开展。量子计算研究机构和企业，与金融、能源、化工、医疗、科研等行业领域机构企业合作开展应用问题研究成为重要趋势。量子计算的应用场景探索主要包括量子模拟、量子组合优化、量子人工智能和量子线性代数等领域方向。

量子模拟利用受控量子系统对目标微观粒子体系进行原貌模拟，助力理解和预测目标体系的相互作用和状态演化规律等特性，已成为前沿科研领域研究复杂量子现象的重要工具，有望在制药、材料、化工等行业带来颠覆性变革，**被业界认为是量子计算可能率先产生实用价值的重点突破方向**。2024 年，中科大构建量子模拟器“天元”成功求解费米子哈伯德模型⁵⁷。清华大学基于 300 囚禁离子演示可调

⁵⁷ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07689-2>

耦合强度和模式的长程量子伊辛模型量子模拟，实现可单比特分辨的量子态测量⁵⁸。IBM 和克利夫兰诊所合作利用量子-经典混合方法预测蛋白质结构并有效提升预测精度⁵⁹。Novonosis 和 Kvantify 使用混合量子-经典计算方法演示酶促反应，有望助力生物研究和二氧化碳捕获⁶⁰。微软利用量子计算模拟大幅缩短新型电池材料预筛选时间⁶¹。

量子组合优化通过量子技术为大规模复杂组合优化问题提供高效解决方案，主要应用领域包括金融、能源、物流等。2024 年，花旗银行和 Classiq 联合研究投资组合优化的量子解决方案，基于预期回报和风险水平构建了性能更优的风险投资组合⁶²。美国 IonQ 与德国基础科学研究中心将量子计算应用于航班登机口优化，提升服务效率⁶³。新加坡量子技术中心使用量子计算探索解决交通路径规划问题，有望大幅提高交通系统的整体运行效率⁶⁴。

量子人工智能是两大前沿领域的交叉研究热点，利用量子计算提升机器学习等算法运行效率，有望在金融、交通、气象等领域应用。2024 年，英国石油公司和 ORCA 使用混合量子-经典机器学习方法探索量子计算提升化学领域机器学习算法潜力⁶⁵。美国 Zapata

⁵⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07459-0>

⁵⁹ <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.4c00067>

⁶⁰ <https://www.kvantify.com/inspiration/worlds-first-calculation-of-enzymatic-reactions-on-a-quantum-computer>

⁶¹ <https://techcrunch.com/2024/01/09/microsoft-puts-azure-quantum-elements-to-work/>

⁶²

<https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/citi-and-classiq-advance-quantum-solutions-for-portfolio-optimization/>

⁶³

<https://investors.ionq.com/news/news-details/2024/IonQ-and-DESY-Research-Highlights-Quantums-Potential-Benefits-for-Airport-Flight-Gate-Optimization/default.aspx>

⁶⁴ <https://www.quantumlab.org/about/highlight/2024-06-vehicle-routing-efficient-qubits>

⁶⁵

<https://chicagoquantum.org/news/university-government-and-industry-researchers-join-forces-explore-how-quantum-computing-could>

和 Insilico Medicine 合作利用量子人工智能开发具有更高结合亲和力的新型 KRAS 抑制剂分子⁶⁶。帝国理工学院和谷歌将新型数学方法与费米子神经网络相结合，寻找量子化学领域分子状态建模解决方案⁶⁷。

量子线性代数涵盖多种量子算法，有望为密码学、交通物流等领域的计算困难问题带来指数级加速。2024 年，麻省理工学院设计了将 Regev 算法与 Shor 算法结合新算法，有望使 Shor 算法在小规模量子系统中高效运行⁶⁸。芝加哥大学与阿贡实验室联合开发可模拟高斯玻色子采样算法，探索量子系统复杂性，促进量子-经典计算协同⁶⁹。

量子计算应用探索仍未实现“杀手级”应用突破，当前应用案例受限于硬件能力不足，在问题规模和求解精度等方面难以体现指数级加速求解的量子优越性，主要属于原理性验证和可行性实验。2024 年 7 月，美国 Gartner 发布的深度技术成熟度曲线⁷⁰显示，量子计算技术翻越“过高期望”顶点，短期内如果无法在实用化问题中展现应用价值，可能面临“幻灭之谷”的发展低潮。

近年来，量子计算企业数量不断增长，上中下游相关企业数量已达 300 余家，产业链和产业生态已初步形成并持续发展，欧美量子计算企业数量众多，产业生态高度活跃。

⁶⁶<https://zapata.ai/news/for-the-first-time-quantum-enhanced-generative-ai-generates-viable-cancer-drug-candidates/>⁶⁷ <https://doi.org/10.1126/science.adn0137>⁶⁸ <https://news.mit.edu/2024/toward-code-breaking-quantum-computer-0823>⁶⁹ <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02535-8>⁷⁰ <https://www.gartner.com/en/documents/5573927>

产业链上游涵盖量子计算机研制所需的核心材料、器件、组件，以及环境支撑与测控系统等，是量子计算产业生态的支撑底座。当前，多种量子计算技术路线并行发展，导致上游供应链存在发展不确定性和碎片化趋势。欧美企业在高端材料、高性能光电器件和加工制造装备等领域具备传统优势，对打造量子计算产业供应链提供有力支持。我国近年来在低温电子学组件、集成化测控系统，以及稀释制冷机、电子束曝光机等重点装备攻关方面取得重要突破，但供应链整体自主保障能力仍有待进一步提升。

产业链中游企业包括量子计算原型机制造商和软件供应商，是产业生态的核心环节。原型机方面，投入超导路线的企业数量最多，占比超过三分之一，离子阱、中性原子、光量子 and 硅半导体等路线也均有国内外企业布局。软件方面，通过开源社区推动软件产品迭代和用户生态培育是主要趋势，科技巨头依托传统软件生态影响力占据先发优势。欧美量子计算企业在技术创新成果、产品性能指标和生态合作能力处于领先。我国量子计算企业数量、规模较小，在技术产品研发成果和应用场景探索等方面，与欧美头部企业相比仍有差距。

产业链下游企业包括云平台供应商和行业应用企业等。IBM、微软、亚马逊等量子计算云平台在硬件水平和用户数量等方面处于领先，支持量子算法研究和应用场景探索成果丰富。欧美金融、化工、交通等领域行业应用企业高度关注量子计算应用探索，研发布

局和投入力度均保持较高水平。我国量子计算云平台在软硬件能力和业务模式探索等方面仍需进一步提升和突破，行业领域企业对量子计算应用探索的关注和投入力度也有待加强。

（五）构建测评体系成为热点，支撑技术与产业发展

随着量子计算原型机、软件和算法等方面技术研究和工程化研发不断深化，国内研究机构和企业纷纷推出样机产品和平台服务，对量子计算系统软硬件功能、性能和平台服务能力等进行表征、比对和测试验证，已成为业界关注焦点。基准测评通过设计科学的测试方法、工具和系统，对测试对象的性能指标进行定量和对比。量子计算基准测评体系研究可为业界验证量子计算系统性能，以及技术产业发展水平提供重要参考，同时也为引导技术研发迭代、促进良性竞争、凝聚行业共识，提供有力支撑。

近年来，国内外研究机构和企业研究提出多项量子计算测评基准参数与方法，通常包含不同种类的具有特定功能的运算任务，为不同技术路线的量子计算硬件系统提供了相对公平的性能比对方案，量子计算硬件性能基准测评指标体系如图 11 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 11 量子计算硬件性能基准测评指标体系

量子计算硬件性能基准测评指标体系从电路底层到应用上层主要包括量子比特级、量子电路级、系统级、算法级和应用级等五类指标，不同层级基准测评指标侧重点和适用性等方面存在差异。量子比特级、量子电路级等底层基准，与量子芯片硬件关联度高，通用性较好，可充分体现各种技术路线性能差异，便于硬件开发者精准发现问题并提出解决方案。系统级、算法级和应用级等上层基准则体现出更为集中和直观的特点，屏蔽底层硬件细节，可通过少数关键参数综合评价量子计算硬件系统整体性能，及其在解决特定应用问题时的综合能力，上层基准指标更适用于评价用户实际需求与量子计算系统能力之间的匹配程度，助力用户进行硬件和算力资源选择。

量子计算性能基准指标和测试验证方法仍在持续开展研究探索。2023 年 12 月，IBM 提出每层门误差（EPLG）评价指标，能够在更

加准确地评估串扰的同时，计算错误缓解所需的电路数量，此外，还更新了每秒电路层操作数（CLOPSh）定义方法⁷¹，可以更真实地反映量子计算系统计算速率。EPLG、CLOPSh 和 IBM 早期提出的量子体积（QV）三个指标，可以从规模、质量和速度三个维度综合评价量子计算系统硬件性能。2024 年，QEDC 更新面向应用（App-Oriented）量子计算基准测评套件⁷²，扩展了面向 VQE、HHL、量子机器学习等算法的测评基准方法，同时引入了计算结果质量和计算成本等参数共同进行量子计算系统性能评估。

美国高度重视量子计算基准测评能力与平台建设。国防高级研究计划局（DARPA）发起量子基准测试计划（QBI）⁷³，重点开展量子算法及系统应用基准测试研究，构建工业级量子计算机测试指标体系与验证平台，DARPA 还与伊利诺伊州签署谅解备忘录⁷⁴，共建用于测试量子计算原型机的量子试验场。

在与业界研究机构和企业合作开展联合研究和测试验证基础上，2024 年 9 月，在中国信息通信（PT）展第四届量子计算论坛，中国信息通信研究院正式发布量子计算测评体系 1.0，涵盖量子计算全栈软硬件产品功能和性能基准，以及相应测试方法，如图 12 所示。

⁷¹ <https://arxiv.org/abs/2311.05933>

⁷² <https://arxiv.org/abs/2402.08985>

⁷³ <https://executivegov.com/2024/07/darpa-launches-quantum-benchmarking-initiative/>

⁷⁴ <https://www.darpa.mil/news-events/2024-07-16>



来源：中国信息通信研究院

图 12 量子计算测评体系 1.0

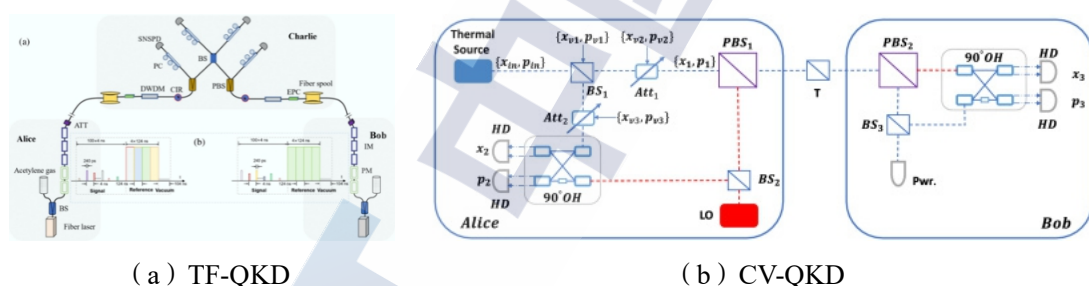
在硬件层面，测评对象涵盖各技术路线的通用和专用量子计算原型机，以及基于经典计算实现的量子线路模拟器。在算法层面，通过控制量子算法执行过程中的各种变量，可开展量子算法求解性能、加速优势、量子计算硬件兼容性、可扩展性、通用性、实用性等方面测试评估。在软件层面，鉴于量子计算软件尚处于迭代起步的发展阶段，体系主要借鉴经典通用软件的测评维度和测试方法，开展量子计算软件的功能测试、集成测试、性能测试、安全性测试、软件成熟度评估以及用户界面和用户体验测试。在云平台层面，依托标准、企业标准、定制化测试方案等，开展量子计算云平台功能完备性测试、接口一致性测试、硬件资源性能测试、安全性测试、差异化功能验证以及云服务能力分级测试。中国信息通信研究院将与业界合作研究迭代量子计算测评体系，开展量子计算技术、产品

和服务测试验证，凝聚行业共识合力，共同推动量子计算从“能用”到“好用”、最终走向“实用”。

三、量子通信研究与应用进展

（一）量子密钥分发科研持续推进，量子卫星受关注

基于 QKD、QRNG 和量子安全直接通信等方案的量子保密通信，是量子通信领域进入实用化阶段的技术方向。近年来，新型协议研究、系统试验验证和样机工程化研发不断推进，实验系统性能指标得到提升，产品仍需进一步提质降本，完善系统和网络现实安全性标准规范和测试验证，才能有效推动技术产品和解决方案走向规模化商用。



来源：（a）Phys. Rev. Lett. 132, 260802 （b）Photon. Res. 12, 1485-1493

图 13 新型协议 QKD 系统实验（a）TF-QKD （b）CV-QKD

在 QKD 科研探索方面，提升双光场（TF）和连续变量（CV）等新型协议系统的性能和实用化水平是学术界关注点。2024 年 6 月，济南量子院报道⁷⁵利用乙炔分子气室作为本地绝对频率参考，实现无需统一光学频率参考的 TF-QKD 系统 502 公里光纤传输，如图 13（a）所示，等效成码率约为数 bit/s，有望提升 CV-QKD 技术实用化

⁷⁵<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.260802>

水平。7 月，上海交大报道⁷⁶基于高带宽探测与信号采集的新型被动态制备 CV-QKD 方案，如图 13（b）所示，通过抑制被动态制备及强本振复用传输引入的噪声，在 5 公里光纤实现 1.09 Gbit/s 密钥成码率，有望成为接入网高速 QKD 解决方案。

开发应用新型器件、光纤和信道，也是 QKD 系统前沿实验探索的重要方向。2024 年 3 月，丹麦技术大学报道⁷⁷基于 52 公里现网 4 芯光纤，实现四维混合时间路径编码 QKD 系统传输实验，密钥成码率为 51.5kbit/s，多芯光纤有助于提升高维 QKD 系统传输鲁棒性。7 月，德国莱布尼茨汉诺威大学报道⁷⁸使用半导体量子点确定性单光子源取代弱相干脉冲光源，基于偏振编码 BB84 协议完成 79 公里现网光纤中 QKD 传输，密钥成码率约为 4.5kbit/s。美国斯坦福大学提出⁷⁹基于真空腔和远距离空间透镜阵列组合的真空光束波导（VBG）量子信道方案，信道损耗比光纤降低 3 个量级，同时具备高光谱带宽优势，有望在无量子中继条件下支持数千公里级地面传输。

在 QRNG 前沿研究方面，提升样机产品集成化水平，探索测量设备无关（MDI）和设备无关（DI）等新型协议和系统实现，是业界努力目标。2023 年 12 月，中科大报道⁸⁰通过将量子非局域性、量子安全算法和零知识证明相结合，构建了基于 DI-QRNG 的随机数信标公共服务系统，采用量子安全签名算法保障随机数广播安全性，

⁷⁶<https://doi.org/10.1364/PRJ.519909>

⁷⁷<https://doi.org/10.1038/s41467-024-45876-x>

⁷⁸<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01488-0>

⁷⁹<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.020801>

⁸⁰<https://doi.org/10.1073/pnas.2205463120>

可向公众提供随机数生成服务。2024 年 2 月，山西大学报道⁸¹基于宽带压缩态光源和含噪声本振光同相检测的源无关 QRNG，随机数生成速率达 580.7Mbit/s。4 月，中科大报道⁸²对单光子源的不完善性进行鲁棒测量层析方法，实现高速时间-分时编码 MDI-QRNG，随机数生成速率达到 23Mbit/s，成为 MDI-QRNG 速率新纪录。5 月，东芝欧研所报道⁸³实现高集成度 QRNG，单芯片包含光学量子熵源和后处理，连续运行 38 天随机数生成速率达到 2Gbit/s。

星地量子通信作为当前突破量子态远距离传输瓶颈的主要技术方案，已成为探索 QKD 广域组网和灵活应用的重要方向。我国 2016 年发射全球首颗量子科学实验卫星“墨子号”，完成一系列国际领先的星地量子通信实验，成为空间量子科学研究的开拓和引领者⁸⁴。2022 年发射首颗量子微纳卫星“济南一号”，开发小型化量子卫星地面接收站，进一步探索验证星地量子密钥分发应用。2024 年 8 月，中科大报道⁸⁵济南一号微纳 QKD 卫星与多地小型化地面站间的星地 QKD 实验，卫星有效载荷重量为 22.7 千克，在距地面 500 公里太阳同步轨道运行，系统工作频率达到 625MHz，具备双向激光通信和实时后处理密钥生成能力，小型化地面站重量约为 100 千克，单轨密钥成码量达 595kbits。8 月，外媒报道⁸⁶德国慕尼黑大学研制的 QKD

⁸¹<https://doi.org/10.1038/s41534-024-00814-z>

⁸²<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/ad34f4>

⁸³<https://doi.org/10.1038/s41928-024-01140-0>

⁸⁴http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202112/t20211224_394517.htm

⁸⁵<https://arxiv.org/html/2408.10994v1>

⁸⁶<https://thequantuminsider.com/2024/08/20/germanys-qube-cubesat-explores-quantum-key-distribution-in-space-on-spacex-mission/>

载荷搭载小型立方体卫星（Qube）成功发射升空，将开展星地 QKD 技术验证。加拿大滑铁卢大学报道⁸⁷完成量子加密和科学卫星（QEYSSat）量子光源载荷研制，计划明年正式发射。

（二）量子信息网络是研究热点，多方推动前沿探索

基于量子隐形传态、量子存储中继和量子态转换等关键技术构建量子信息网络，也称量子互联网或量子网络，可以实现量子信息系统的互联组网，进一步提升量子计算机运算处理能力和量子传感器测量精度和灵敏度，带来全新网络架构和信息传输模式。量子信息网络是量子信息三大领域未来融合发展的演进方向，当前主要处于技术方案探索和试验验证阶段，国内外科学研究高度活跃，在协议方案、核心器件、转换接口和组网实验四方面取得诸多进展和成果。

在协议方案方面，提高量子隐形传态的抗环境噪声能力和传输效率等性能指标是主要的改进方向。2023 年 10 月，谷歌报道⁸⁸在超导量子处理器中，基于测量诱导相变方法实现量子比特间纠缠和隐形传态，增强对环境噪声的鲁棒性。2024 年 1 月，清华大学报道⁸⁹利用同种离子的两对超精细结构能级分别编码通讯比特和存储比特，利用双色窄线宽激光实现两种量子比特之间微秒量级的相干转换，实现了无串扰的量子网络节点，为模块化量子计算互联提供系统简化方案。5 月，中科大报道⁹⁰利用多体混合纠缠逆转开放量子系统演

⁸⁷<https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/news/quantum-sources-satellite-missions>

⁸⁸<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06505-7>

⁸⁹<https://doi.org/10.1038/s41467-023-44220-z>

⁹⁰<https://doi.org/10.1126/sciadv.adj3435>

化中的相位退相干，实现了克服环境噪声的高保真度量量子隐形传态方案，量子态测量保真度接近 90%。6 月，浙江大学报道⁹¹采用蒙特卡洛退火优化方法，寻找二维量子网络最佳耦合参数，在设备不完美条件下实现 90% 的单激发态传输保真度。9 月，美国 Quantinuum 公司报道⁹²基于横向门和晶格手术两种方式实现逻辑量子比特隐形传态，保真度达 97.5%，为分布式量子计算互联网奠定基础。

在核心器件方面，研制高性能集成化量子态光源和探测器，提升量子存储器关键性能指标是业界主要趋势。2023 年 11 月，南京大学报道⁹³在掺铈离子晶体固态量子存储器中实现电信波段纠缠光子存储，存储时间科大 1.936us，有助于构建固态器件量子网络。2024 年 4 月，德国弗罗茨瓦夫科技大学报道⁹⁴电信波段半导体量子点光源实现不可区分单光子触发生成，并将通量提高 30%，突破电信波段单光子产生技术难题。电子科大报道⁹⁵基于氮化镓材料制备量子光源芯片，将输出波长范围增加到 100nm，有望实现大规模片上集成。5 月，英国布里斯托大学报道⁹⁶实现硅基量子光探测器芯片，尺寸为 80um×220um，带宽达到 15.3GHz，突破分立器件的电容限制，大幅提升了量子探测器性能。7 月，瑞士量子电子学研究所报道⁹⁷基于光镊操控光晶格腔中二维原子阵列实现量子寄存器，可用于多路复用

⁹¹<https://doi.org/10.1038/s41467-024-48791-3>

⁹²<https://doi.org/10.1126/science.adp6016>

⁹³<https://doi.org/10.1038/s41467-023-42741-1>

⁹⁴<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47551-7>

⁹⁵<https://doi.org/10.1038/s41467-024-47551-7>

⁹⁶<https://doi.org/10.1126/sciadv.adk6890>

⁹⁷<https://doi.org/10.1126/science.ado6471>

的原子-光子纠缠，整体检测效率接近 90%。8 月，深圳量子院报道⁹⁸高品质微腔四波混频方案的硅基集成量子光源，纠缠光子对的线宽低至 25.9MHz，干涉可见度 0.973，大幅提升了光源亮度。

在转换接口方面，实现里德堡原子、电子自旋等体系中微波量子态和光量子态的频率转换和物理连接是研究热点。2023 年 10 月，波兰华沙大学报道⁹⁹基于里德堡原子系综的微波-光学量子态转换器，动态范围 57dB，转换带宽 16MHz，噪声等效温度 3.8K，具备室温工作特性，有望成为原子量子计算互联方案。美国亚马逊公司报道¹⁰⁰基于锥形光纤和金刚石芯片绝热耦合的光子信号转换接口，可在 mK 至室温温区稳定运行，插入损耗仅 0.4dB，克服热膨胀引入的微小位移影响，无需使用额外对准机制。2024 年 3 月，美国加州理工报道¹⁰¹基于氮化铌材料的压电-光转换器，通过与光稳定超导共振腔单片集成有效提高了微波量子读出效率和噪声表现，可用于光网络与超导量子计算处理器。4 月，英国帝国理工报道¹⁰²非共振级联吸收量子存储协议，通过光谱和时间整形技术优化光子特性，实现量子点单光子源与原子量子存储器接口，并可进行确定性存储与检索。

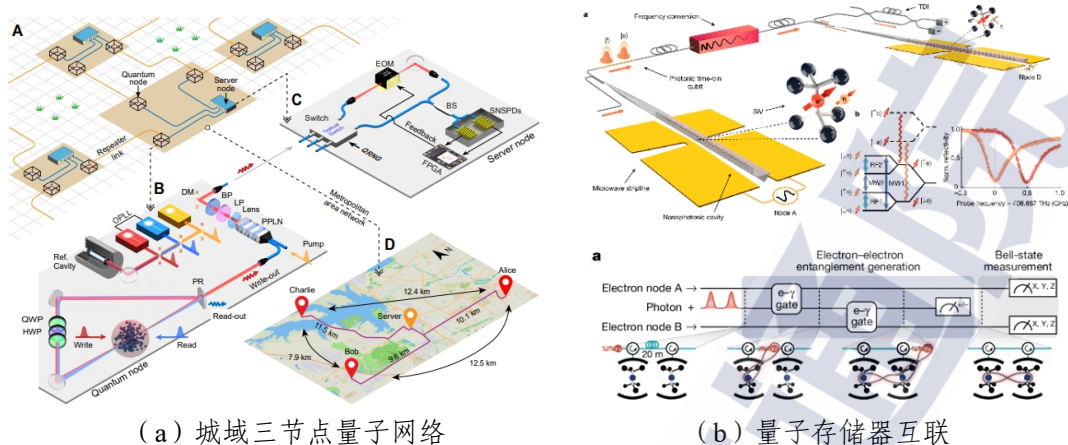
⁹⁸<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.083803>

⁹⁹<https://doi.org/10.1038/s41566-023-01295-w>

¹⁰⁰<https://doi.org/10.1063/5.0170324>

¹⁰¹<https://doi.org/10.1038/s41567-024-02409-z>

¹⁰²<https://doi.org/10.1126/sciadv.adi7346>



(a) 城域三节点量子网络

(b) 量子存储器互联

来源：(a) Nature v629, p579–585 (2024) (b) Nature v629, p573–578 (2024)

图 14 量子信息网络实验 (a) 城域三节点量子网络 (b) 量子存储器互联

在组网实验方面，在现网中开展基于量子存储的纠缠传输和组网原型实验取得重要进展。2024 年 5 月，中科大报道¹⁰³基于单光子相位控制和量子频率转换技术，城域三节点量子网络中实现独立存储节点间纠缠，如图 14 (a) 所示，点到点最远距离达 12.5 公里，成为国际首个城域多节点量子网络实验。哈佛大学报道¹⁰⁴在波士顿地区光纤线路实现两个金刚石色心量子存储器节点间光量子纠缠，如图 14 (b) 所示，传输距离达到 35 公里。二者相比，哈佛大学量子纠缠实验光纤传输距离更远，但中科大实验纠缠效率更高，多节点量子纠缠实验组网能力扩展也更具优势。9 月德国萨尔大学报道¹⁰⁵在 14.4 公里城市暗光纤中实现纠缠光子对的频率转换、光纤传输和量子存储，传输保真度达 99%，验证了量子网络协议可行性。10 月，

¹⁰³<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07308-0>

¹⁰⁴<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07252-z>

¹⁰⁵<https://doi.org/10.1038/s41534-024-00886-x>

中科大报道¹⁰⁶基于多模式固态量子存储实现 7 公里现网光纤的量子逻辑门非局域隐形传态，开展了分布式量子计算演示实验。

总体而言，量子信息网络的关键技术仍处于前沿研究和开放探索阶段，实现实用化需要突破高性能量子纠缠光源、实用化量子存储等瓶颈，还需根据量子计算技术演进和收敛情况，明确频率转换接口等实现方案。2024 年 9 月，美国国家量子计划咨询委员会（NQIAC）发布《量子网络：增强美国领导力的发现与建议》报告¹⁰⁷，指出量子网络并非取代传统网络，将助推量子信息领域发展，具有重要应用前景。目前，虽有原型样机和小规模演示实验，但技术成熟度有限仍需持续攻关。美国应加大使能技术研发投资，开发网络功能层协议模型，重点构建量子网络试验网和测试平台，强化国际盟友研发合作，确保在量子网络领域的技术与应用优势。

（三）量子保密通信应用持续探索，仍存在争议

基于 QKD、QRNG 和量子安全直接通信等方案的量子保密通信提升信息安全防护能力具有独特优势。QKD 基于量子态光信号传输、检测和双方协商后处理生成量子密钥，具有窃听可感知的理论协议安全性，可提升对称加密应用中的密钥安全性和更新速率。QRNG 基于真空涨落、相位涨落、自发放大辐射（ASE）噪声等多种类型量子熵源数字采集和后处理压缩生成量子随机数，可提升随机序列不可预测性和生成速率。QKD 生成的量子密钥与互联网安全（IPSec）、

¹⁰⁶<https://doi.org/10.1038/s41467-024-52912-3>

¹⁰⁷<https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2024/09/NQIAC-Report-Quantum-Networking.pdf>

传输层安全（TLS）、光传送网安全（OTNSec）等加密协议中的协商密钥融合，QRNG 生成的量子随机数与数字签名、加密等算法中的初始随机向量等融合，可以实现更高安全性的身份认证和数据加密功能。

量子保密通信应用场景探索在金融、能源、数据中心、移动通信等行业和领域持续开展。英国汇丰银行、美国摩根大通等开展利用 QKD 技术保护金融交易数据安全传输的实验验证，构建量子安全加密线路¹⁰⁸。德国弗劳恩霍夫研究所开发高集成度 QKD 系统，利用量子密钥为天然气管网和电力线路等提供加密保护¹⁰⁹。南方电网联合中电信量子等开展电力调度数据和输电线路监测量子保密通信攻关研究和示范应用¹¹⁰。英国电信联合东芝等开展数据中心的 QKD 技术融合应用探索，提供数据传输加密的“量子密钥即服务”应用¹¹¹。中电信量子推出华为 Mate 60 Pro 量子密话定制终端，支持 SIM 卡密钥充注，结合国密算法实现 VoLTE 高清通话¹¹²。韩国 SKT 推出集成 QRNG 芯片的 Galaxy Quantum 5 量子安全手机，使用量子随机数进行设备内部认证和数据传输加密¹¹³。

广泛使用量子保密通信技术开展融合加密应用仍面临诸多问题

¹⁰⁸<https://www.hsbc.com/news-and-views/news/media-releases/2023/hsbc-pioneers-quantum-protection-for-ai-powered-fx-trading>

<https://www.jpmorgan.com/technology/news/firm-establishes-quantum-secured-crypto-agile-network>

¹⁰⁹<https://www.iof.fraunhofer.de/en/pressrelease/2024/Project-MANTIS-Preventing-cyberattacks-on-gas-control-systems.html>

¹¹⁰<http://www.bidding.csg.cn/zbzg/1200341953.jhtml>

¹¹¹<https://newsroom.bt.com/access-to-quantum-secure-communications-made-easier-for-businesses-in-uk-first-data-centre-to-data-centre-connection>

¹¹²https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=Mzk0NzczNjA1MQ==&mid=2247532309&idx=1&sn=fb86ec97f1d54a4b5c33d340f0ded10b&source=41

¹¹³<https://news.sktelecom.com/206559>

和挑战，商用化前景仍不明朗。2024 年 1 月，法国网络安全局、德国联邦信息安全办公室、荷兰国家通信安全局、瑞典国家通信安全局联合发布《QKD 立场白皮书》¹¹⁴，分析 QKD 技术五方面局限性：一是协议尚未实现标准化，系统现实安全性需要开展测评验证；二是网络“可信中继”节点依靠传统加密技术保护，降低了整体安全性；三是密钥成码率和传输距离等性能指标有限，限制了应用场景；四是大规模组网情况下依赖传统加密技术进行设备身份认证；五是需要专用设备和光纤资源支持，部署和运维成本高。白皮书还指出 QKD 技术在大多数传统密码学场景中难以实际应用，为了应对量子计算快速发展可能引发的密码破解安全威胁，应当尽快采用抗量子密码技术对现有公钥密码体系进行升级迁移。

对量子保密通信规模化应用的发展路径，业界存在不同看法，需进一步探讨明确。有观点认为，当前已有一定用户规模的存储卡离线密钥充注方案，以及量子加密服务平台、密码服务中间件等在线密钥分发方案，其中的密钥经过离线存储和二次转发，与传统密钥并无本质差异，不能称之为量子密钥。例如，根据 GB/T 43692-2024《量子通信术语和定义》规定，量子密钥是通信双方基于 QKD 协议直接生成的对称密钥。也有观点认为，如果仅局限于与 QKD 系统和网络紧耦合的对称加密场景，则量子保密通信难以实现多类型业务融合和规模化应用部署。通过离线充注和在线转发等方式，对 QKD

¹¹⁴https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Crypto/Quantum_Positionspapier.pdf

生成量子密钥和 QRNG 生成量子随机数等进行按需适配和灵活应用，才能有效发挥其技术优势。依靠商业化循环逐步提升 QKD 和 QRNG 技术产品成熟度和网络覆盖，才能最终实现量子保密通信与信息通信系统融合。未来，加快量子保密通信技术工程化研发，实现产品提质降本，开发重点行业领域专网和高安全性加密专线等典型应用场景，是推动量子保密通信突破应用局限性和产业化瓶颈的发展方向。

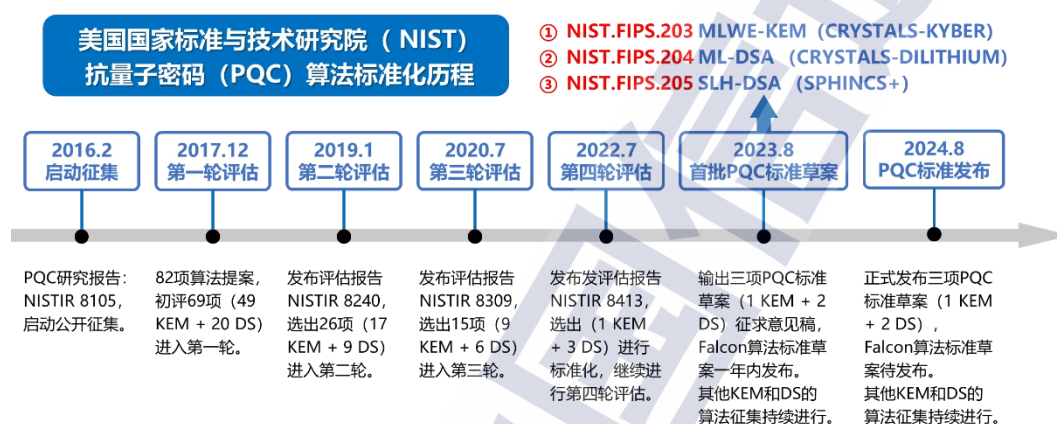
（四）抗量子加密标准正式发布，升级迁移逐步启动

密码是保障网络空间实体身份“真实性”，数据传输“机密性”和“完整性”，关键行为“不可否认性”的基石。近年来，量子计算技术发展迅速，密码破解算法研究不断深入¹¹⁵，未来可能快速破解 RSA、ECDH 等当前广泛使用的公钥密码，引发网络信息安全风险“牵一发而动全身”，不仅会对网络空间数字信任体系造成破坏性威胁，扰乱政治、经济、社会正常运行，还会对外交、军事等需要长期保密的敏感信息带来“先截获，后破解”的追溯性威胁。采用格加密、多变量加密、哈希签名等新型数学难题，构建抗量子计算破解密码，简称抗量子加密（PQC），通过制定算法标准、开发加密解决方案、开展试点应用与测试验证，逐步推动现有公钥密码体系向 PQC 升级迁移，成为信息安全领域应对量子计算引发信息安全威胁的重要举措。

PQC 三项算法标准已正式发布。欧美密码学界在 PQC 领域研究近三十年，推动 PQC 技术逐步走向成熟，具备了实用化能力。美国

¹¹⁵<https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.06572>, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.00899>

NIST 牵头开展 PQC 算法标准研究，2016 年 12 月正式启动 PQC 算法标准的全球征集与评选工作，先后历时八年，经历算法征集、验证评估和标准编制三个阶段，2024 年 8 月正式发布了首批三项 PQC 算法标准¹¹⁶，另有一项 PQC 算法标准待发布。美国 NIST 组织 PQC 算法标准研究工作历程如图 15 所示。



来源：中国信息通信研究院

图 15 美国 NIST 抗量子密码 (PQC) 标准化历程

在 NIST 首批选定的四种 PQC 算法标准中, 基于格加密的 Kyber 和 Dilithium 两种算法的业界认可度最高, 加密安全性、密钥大小和运算速度等指标领先, 综合性能出众, 预计将成为大多数加密应用场景中的 PQC 算法首选。另一个基于格加密的 Falcon 算法 (暂未正式发布标准) 可用于数字签名, 其签名尺寸更小, 整体性能更好, 但实现复杂度较高, 主要适用于硬件资源丰富的加密场景。为了不完全依赖格加密的安全性, NIST 还选择了基于哈希的 Sphincs+ 数字签名算法, 但其签名尺寸大、运算速度较慢, 预计将是数字签名应

¹¹⁶<https://csrc.nist.gov/News/2024/postquantum-cryptography-fips-approved>

用的一种补充方案。此外，NIST 还在持续组织针对 PQC 密钥封装和数字签名算法的征集和评估，未来可能选择更多 PQC 算法制定标准。

PQC 算法和应用的安全性有待进一步验证。当前业界对量子计算硬件和破解算法的研究仍不充分，现有 PQC 算法能否完全抵御量子计算破解仍有待研究。NIST 在 PQC 算法标准化过程中选择多种算法方案，并持续征集评估，既有适用不同应用场景的灵活性考虑，更反映出“不把所有鸡蛋放在同一个篮子”的安全性考虑。2023 年 4 月，清华大学提出可能破解格密码的量子算法¹¹⁷，法国 PSL 大学提出可削弱格密码的量子启发算法¹¹⁸，虽然攻击有效性有待密码学界深入评估和验证，但对于 PQC 算法安全性的挑战也引发业界高度关注。此外，美国 NIST 主导和国家安全局（NSA）深度参与制定 PQC 算法标准，在相关应用产品和服务中是否会存在可被利用的“后门”，也对 PQC 的应用安全性带来了不确定性。

美国政府层面大力推动 PQC 升级迁移。2022 年，美国白宫发布第 10 号国家安全备忘录《促进美国在量子计算领域的领导地位，同时降低密码系统安全风险》¹¹⁹，国会颁布《量子计算网络安全准备法》¹²⁰，NSA 发布商业国家安全算法套件 2.0 版（CNSA 2.0）¹²¹，全面启动国家信息系统 PQC 升级迁移。2024 年 7 月，美国白宫发布

¹¹⁷<https://ia.cr/2024/555>

¹¹⁸<https://ia.cr/2024/601>

¹¹⁹<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/04/national-security-memorandum-on-promoting-united-states-leadership-in-quantum-computing-while-mitigating-risks-to-vulnerable-cryptographic-systems/>

¹²⁰<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/7535>

¹²¹<https://www.nsa.gov/Press-Room/News-Highlights/Article/Article/3148990/nsa-releases-future-quantum-resistant-qc-algorithm-requirements-for-national-se/>

《PQC 报告》¹²²，提出国家信息系统 PQC 迁移战略的主要原则：制定全面和持续的加密系统和应用清单，应在量子计算机实用化之前开始 PQC 迁移，各机构必须优先考虑 PQC 迁移的系统和数据，以及尽早识别无法支持 PQC 算法的系统和应用。报告预计将在 2035 年前完成国家信息系统 PQC 迁移，所需政府投资总额约为 71 亿美元。

欧美科技企业积极响应 PQC 升级迁移。谷歌宣布¹²³为 Chrome 浏览器等服务和服务器间通信启用了基于 Kyber 的 PQC 加密算法保护。苹果公司宣布¹²⁴使用 PQC 算法和 ECC 算法混合构建的 PQ3 加密算法对 iMessage 平台通讯协议加密机制进行升级。AMD 公司推出¹²⁵支持 PQC 算法的 FPGA SoC 产品“Spartan UltraScale+”。德国 Tuta 公司推出¹²⁶量子安全协议服务，使用 PQC 算法与传统加密算法结合为电子邮件服务提供量子安全保障。Viavi 和 Keysight 推出¹²⁷支持 PQC 算法的测试仪表解决方案，为升级迁移应用提供产品检测验证支持。

总体而言，PQC 升级迁移将成为信息安全领域产业升级和竞争格局重构的重要契机，我国需加快制定自主可控的 PQC 算法标准，积极布局开展产品研发和测试验证，适时启动升级迁移等工作。

¹²²https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2024/07/REF_PQC-Report_FINAL_Send.pdf

¹²³<https://blog.chromium.org/2024/05/advancing-our-amazing-bet-on-asymmetric.html>

¹²⁴<https://security.apple.com/blog/imessage-pq3>

¹²⁵<https://www.amd.com/en/products/adaptive-socs-and-fpgas/fpga/spartan-ultrascale-plus.html>

¹²⁶https://www.bleepingcomputer.com/news/security/tuta-mail-adds-new-quantum-resistant-encryption-to-protect-email/#google_vignette

¹²⁷<https://www.viavisolutions.com/en-us/news-releases/viavi-introduces-performance-testing-post-quantum-cryptography-deployments>

<https://www.businesswire.com/news/home/20240430030207/en/>

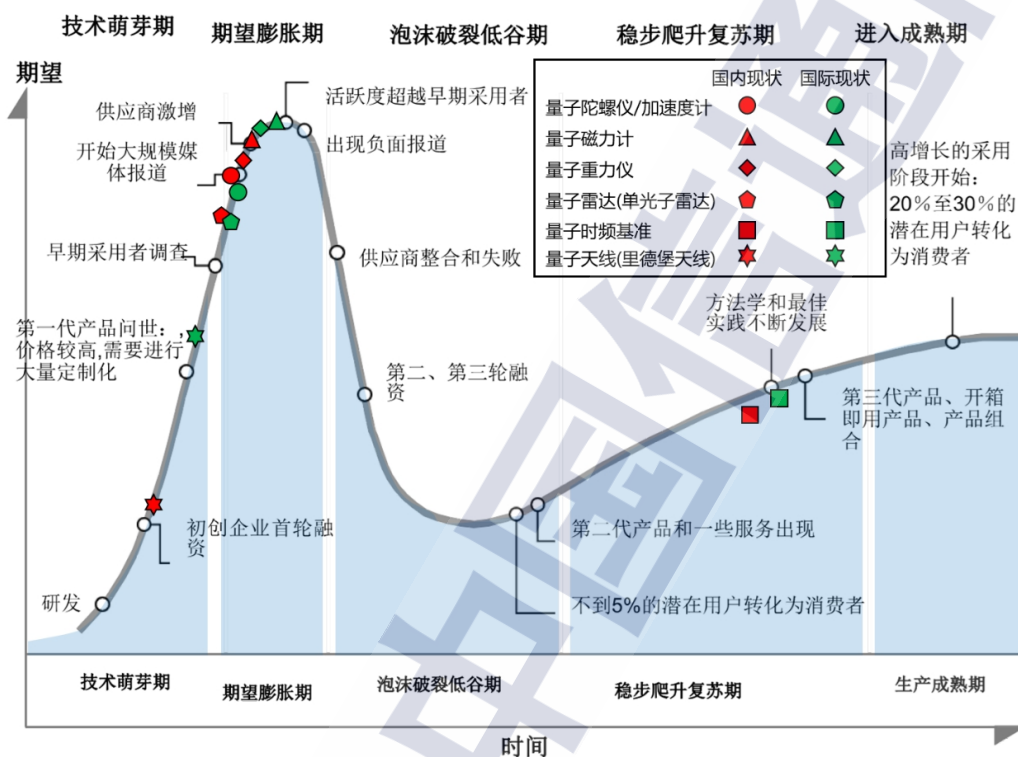
四、量子精密测量研究与应用进展

（一）新技术方案不断涌现，基础前沿研究亮点纷呈

量子精密测量具有技术方案多元、应用场景广泛、战略价值突出等特点，其核心优势在于开发和利用量子叠加、量子纠缠和量子非经典关联等新颖量子物理特性，指数级提升传感测量方法的精度、灵敏度和分辨率等关键指标。量子精密测量系统通过对原子、离子、光子等微观粒子体系中的量子态进行制备、调控与观测，实现对外部物理量变化的更精确、更可靠且可溯源的测量与传感。量子精密测量主要技术方案包括冷原子干涉、核磁/顺磁共振、金刚石色心、无自旋交换弛豫原子自旋（SERF）以及借助量子纠缠或压缩效应增强的探测等。可实现传感测量的物理量种类繁多，如频率、时间、重力场、加速度、角速度、磁场、电场、温度乃至物质痕量检测等。量子精密测量技术应用场景覆盖基础科研、国防军工、航空航天、定位导航、环境监测、生物医疗及资源勘探等众多行业领域。

量子精密测量领域不同技术方案与传感测量产品的技术成熟度各异，如图 16 所示。微波原子钟等量子时频基准产品已在秒定义、世界协调时、卫星定位导航等领域广泛应用，新一代光学原子钟、核钟研究蓬勃发展，有望进一步提升时间频率计量精度。原子干涉磁力仪和重力仪等已有样机产品，在心/脑磁医疗检测、地质资源勘测等领域开展示范应用。量子陀螺仪和加速度计组成量子惯性导航系统，里德堡原子天线电场测量系统和量子雷达等技术，未来有望

在国防军工领域带来自主定位导航、战场态势感知等方面带来改变游戏规则式的颠覆性应用。除上述业界关注度较高的技术产品外，近年来新型量子精密测量技术方案和应用场景研究成果也不断涌现。



来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

图 16 量子精密测量主要技术方案与产品发展成熟度

基于量子纠缠测量方案可突破经典方法性能极限。2023 年 11 月，俄勒冈大学报道¹²⁸量子纠缠干涉成像技术新方案，通过联合测量确定模拟热光源的空间分布，证明量子纠缠在成像领域的应用潜力。12 月，韩国标准科学研究院报道¹²⁹基于纠缠光源实现了量子光学诱导相干断层扫描（QICT），重构由蓝宝石、硅和玻璃板制成的

¹²⁸ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.210801>

¹²⁹ <http://doi.org/10.1088/2058-9565/ad124d>

参考样品的深度分布图。2024 年 3 月，英国格拉斯哥大学提出¹³⁰基于量子纠缠的量子辅助自适应光学成像技术，成像清晰度提高 20.52%。

新材料、新原理、新效应进一步拓展量子精密测量技术方案边界。2024 年 4 月，德国维尔茨堡大学基于量子反常霍尔效应提出了新型量子电阻标准¹³¹，提高电阻测量的准确性，无需任何外部磁场，有望改进现有计量标准。7 月，韩国基础科学研究所、德国于利希研究中心联合团队利用含羰基有机共轭分子实现了原子尺度的电场/磁场传感器¹³²，与扫描隧道显微镜相结合有望实现对原子、分子和纳米结构成像。8 月，悉尼理工大学开发基于六角形氮化硼（HBN）的二维量子传感芯片¹³³，可同时探测温度异常和任意方向磁场，有望实现更廉价更通用的量子传感器。深圳量子院与中科大等合作利用玻色模式光子数滤波器量子控制方法，在高品质因子超导微波谐振腔中成功制备高达 100 个光子的 Fork 态，实现对微波电磁场的微小位移或相移变化的高灵敏度探测，测量精度增益超越标准量子极限高达 14.8dB，逼近海森堡极限¹³⁴。9 月，英国格拉斯哥大学等联合团队利用掺杂五烯炔演示室温下相关自旋控制¹³⁵，有望实现室温量子传感和成像。

¹³⁰ <http://doi.org/10.1126/science.adk7825>

¹³¹ <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01156-6>

¹³² <https://doi.org/10.1038/s41565-024-01724-z>

¹³³ <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51129-8>

¹³⁴ <https://doi.org/10.1038/s41567-024-02619-5>

¹³⁵ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.120801>

量子精密测量技术发展推动基础科学研究探索。量子精密测量可用于探测宇宙中的基本常数变化、检验量子力学的基本原理、研究量子力学与广义相对论的统一理论、探索宇宙的起源和演化等。2024 年 4 月，北京大学报道¹³⁶利用相距 1700 公里的电磁屏蔽屋内的磁力仪对暗光子进行探测，通过构造长基线量子传感器网络提高暗物质搜寻的灵敏度。7 月，美国费米国家实验室和芝加哥大学联合团队利用超导量子位来制备非经典 Fork 态的超导微波腔，激发暗物质波发射光子，成功将暗物质探测的扫描速率提高 2.78 倍¹³⁷。8 月，美国史蒂文斯理工学院和瑞典斯德哥尔摩大学联合团队提出利用量子传感器探测单个引力子的新方法¹³⁸，通过观测量子跳跃（quantum jump）现象，可推断引力子的吸收。我国“超高灵敏极弱磁场与惯性测量装置项目”国家重大科技基础设施本体计划于 2024 年 12 月开工，2029 年建设完成，包括 1 个大型“零磁”空间、三类 9 种科学装置与仪器、三类高性能磁屏蔽舱，建成后将有效推动我国磁异常探测、深空磁探测、心脑磁成像等领域基础科学研究¹³⁹。

（二）欧美加大布局与投资力度，推动重点领域应用

量子精密测量技术在航空航天、国防军工等领域应用的战略价值突出，在欧美发达国家备受重视。政府部门通过科技项目支持、政府合同赠予、技术产品采购等方式，成为推动量子精密测量技术

¹³⁶ <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47566-0>

¹³⁷ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.140801>

¹³⁸ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07839-6>

¹³⁹ http://ghzy.hangzhou.gov.cn/art/2024/6/27/art_1228962611_58948116.html

发展、产品熟化和应用落地的重要支持者和首批用户。

美国能源部发布小企业创新研究计划（SBIR），设置多个量子精密测量项目¹⁴⁰，资助初创企业开展相关技术研发和产品转化。芯片级量子定位、导航和授时（PNT）传感器企业 Mesaquantum 获得 190 万美金为美国空军开发小型化原子钟。量子器件设计软件企业 QuanCAD 获得资助为美国航空航天局（NASA）开发用于探测行星上水源的量子传感器。单光子探测器企业 Amethyst Research 获得 165 万美元资助开发用于量子成像和传感的超高性能红外探测器。光学测量设备企业 Mesa Photonics 获得 165 万美元资助开发用于生物成像的量子增强传感器。超导量子干涉仪企业 STAR Cryoelectronics 获得 20 万美元资助开发基于钽材料超导体的量子传感器，通过在极低温度下工作来提供极高的能量分辨率，可用于研究宇宙基本粒子。美国国家科学基金会设立五个国家量子虚拟实验室（NQVL）¹⁴¹，其中量子传感与成像实验室（Q-SAIL）旨在开发基于二维俘获离子阵列的量子传感器，推动在频率计量、信息通信、定位导航及生物医疗等领域应用。美国 DARPA 资助军用级原型量子激光器的开发，通过将光粒子对纠缠产生由两种不同波长组成的相干激光束，每秒发送一百万个纠缠光子对，提升各类应用场景中的稳定性和可靠性。

英国科学、创新和技术部（DSIT）设立量子催化剂（Quantum

¹⁴⁰ <https://science.osti.gov/sbir/Awards>

¹⁴¹ <https://new.nsf.gov/news/nsf-national-quantum-virtual-laboratory-advances>

Catalyst) 基金¹⁴²，投资 1500 万英镑，三家量子精密测量企业获项目支持。量子磁力计企业 Cerca 进行量子脑磁扫描仪的开发，用于癫痫和痴呆症等疾病诊断；非侵入式铁路轨道监控传感器企业 Monirail 开发火车智能导航系统，利用量子传感器提高隧道行使安全性；量子重力仪企业 DeltaG 基于重力梯度传感器技术开发半自主监测系统，对城市地下基础设施进行扫描，发现地质结构潜在危险。

加拿大国防部设立国防卓越与安全创新 (IDEaS) 项目¹⁴³，对量子精密测量与量子传感领域初创企业给予支持，资助量子增强导航、微波量子雷达、用于卓越态势感知的量子增强仪器、芯片上中红外量子传感器和用于 PNT 和地球观测的增强量子时钟和惯性传感器等五个项目，每个项目将获得 300 万加元的启动资金。

量子精密测量领域的多项技术产品具有军民两用特点。时间频率、电磁场、重力场等关键信息测量，以及目标探测识别和自主惯性导航等核心能力，对于战场态势感知和运载平台测控等方面具有重要价值。量子精密测量技术国防领域应用的主要方向和场景如表 1 所示。

表 1 量子精密测量技术国防领域应用前景概况

技术方向	典型产品	传感单元	应用场景
定位、导航、授时	量子时钟	热原子、冷原子	提供高精度时间/频率信号，可用于卫星定位导航、授时/守时等场景。

¹⁴²

<https://www.quantumsensors.org/news/2024/02/06/quantum-catalyst-funding-announced-for-cerca-monirail-and-delta-g>

¹⁴³

<https://www.canada.ca/en/department-national-defence/programs/defence-ideas/element/innovation-networks/challenge/defence-applications-of-quantum-technologies.html>

(PNT)	量子加速度计	冷原子	在卫星定位导航失效时，获得准确加速度信息支持自主惯性导航。
	量子陀螺仪	热原子、冷原子	在卫星定位导航失效时，获得准确角速度信息支持自主惯性导航。
	量子重力仪	冷原子	测量地球重力场分布辅助惯性导航。
	量子磁力计	热原子	利用地球磁场分布辅助惯性导航。
目标探测	量子雷达	单光子	以更高精度获得目标位置/速度等信息。
		纠缠态、压缩态	
	量子磁力计	热原子	通过地球磁场的微弱变化进行地下/水下金属目标探测等。
	量子重力仪	冷原子	开展地质/地下结构探测等。
电场信号探测	量子天线	里德堡原子	宽频谱、高灵敏度的电场信号接收等。
成像识别	量子成像	单光子	实现超远距、非视域、非直接探测等方式的目标检测与成像。
		纠缠态、压缩态	

来源：中国信息通信研究院根据公开信息整理

欧美防务机构和企业积极组织开展量子精密测量技术应用试验验证。2023 年 12 月，美国陆军与 Rydberg Technologies 公司合作，首次利用原子量子接收器实现了远距离无线电通信，有望助力构建新兴防干扰、防黑客通信能力¹⁴⁴。2024 年 5 月，英国 DSIT 宣布在飞机平台成功演示了基于量子技术的惯性导航系统¹⁴⁵，标志着量子惯性导航技术向实际应用迈出重要一步，并计划于 2025 年与英国海军合作在舰船平台对量子-经典混合导航系统进行海上实验。6 月，美国 SandboxAQ 公司推出 AQNav¹⁴⁶，将量子精密测量和人工智能（AI）结合打造商业级实时地磁辅助导航系统，可在卫星定位导航

¹⁴⁴

<https://www.defenseone.com/technology/2023/12/darpa-puts-millions-behind-effort-power-drones-ground-based-lasers/392886/>

¹⁴⁵

<https://www.gov.uk/government/news/un-jammable-quantum-tech-takes-flight-to-boost-uks-resilience-against-hostile-actors>

¹⁴⁶

<https://www.sandboxaq.com/press/sandboxaq-announces-aqnav---worlds-first-commercial-real-time-navigation-system-powered-by-ai-and-quantum-to-address-gps-jamming>

失效时，实现空中、陆地和海洋等环境自主导航。AQNav 系统已在四种不同类型飞机累计实验超过 200 小时，支持 40 余次飞行任务。

（三）光钟性能指标稳步提升，秒定义更新研究启动

量子频率基准已成为时间频率计量领域的“定海神针”。1967 年，第 13 届国际计量大会通过了采用铯原子跃迁频率来定义秒的决议，即以铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的 9,192,631,770 个周期持续时间为 1 秒。从此，时频计量开启了“量子时代”。经过近 60 年的发展，以铯原子钟等为代表的微波原子时频基准已成为支撑信息社会运行的重要底座。近十年来，以光晶格钟等为代表的光学原子时频基准技术发展迅速，将进一步提升时间频率测量与计量精确度，成为新一代时频基准的重要发展方向。

光学频率基准相较于现有微波频率基准具有显著优势。光学频率标准的工作频率范围远高于微波频率标准，使得其频率稳定度的大幅提升以及频率不确定度的显著降低。近年来，光钟研究发展迅速得益于多项核心技术的突破，离子协同冷却技术实现了对离子的高效操控与稳定，离子态的量子逻辑探测技术提升了量子态检测的精度与效率，光晶格囚禁原子技术为原子提供了更为精确与稳定的控制环境，光晶格魔术波长技术进一步优化了原子的囚禁状态，超稳光学腔与超稳激光技术融合应用确保了光学系统的长期稳定性，低温制冷原子腔室技术有效降低了原子系统的热噪声干扰，热屏蔽腔抑制黑体辐射频移技术则可以减少外部热辐射对系统的影响。

近年来，光学频率基准研究不断取得突破，指标提升迅速。当前光钟的测量不确定度指标已经进入 10^{-18} ~ 10^{-19} 量级，标志着时频计量技术进入了新纪元。2024 年 1 月，中科大报道¹⁴⁷通过两套独立的铯原子光晶格钟进行频率比对测量，稳定度在万秒积分时间达到 4×10^{-18} ，还对光钟系统频移因素开展逐项评定，最终得到系统不确定度为 4.4×10^{-18} 。7 月，美国天体物理联合实验室（JILA）报道¹⁴⁸研制铯原子光晶格钟不确定度突破 8.1×10^{-19} ，刷新了时间频率计量精度的世界纪录。10 月，科罗拉多大学博尔德分校、NIST 等联合报道¹⁴⁹利用可编程原子阵列在光学原子钟中制备出 9 个量子比特的 GHZ 纠缠态，实验验证该方案稳定度结果突破标准量子极限（SQL）。加州理工学院与斯坦福大学联合团队报道¹⁵⁰实现了用于中性原子光学原子钟的通用量子操作和基于辅助量子比特的结果读出。

光学原子钟将成为下一代秒定义参考。鉴于光钟技术快速发展，国际时间频率咨询委员会（CCTF）已提出秒定义修改路线图计划，在 2022 年国际计量大会获得通过并启动开展秒定义更新相关研究工作，预计在 2030-2034 年之间，可完成实现秒定义修改。CCTF 提出了三种可能修改方案包括：一是选择一个单一的频率跃迁作为新的秒定义。但是鉴于目前多种技术路线的光钟各具优劣势，可能难以确定一个最佳的秒定义候选。二是采用一组跃迁频率的几何平均值

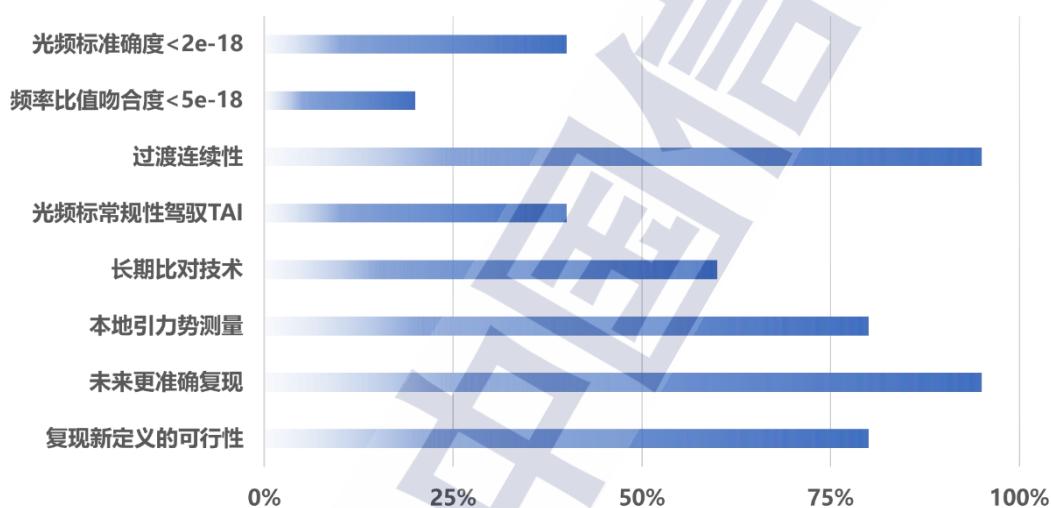
¹⁴⁷ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/ad1a4c>

¹⁴⁸ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.133.023401>

¹⁴⁹ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07913-z>

¹⁵⁰ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08005-8>

来定义一个频率值。这种方式能够兼顾各类光钟的性能优势，但是无法通过同一套实验装置直接复现秒定义。三是定义一个基本物理常数作为秒的定义基础，但是目前物理常数定义频率的相关实验，测量不确定度指标都远低于可复现秒定义的铯原子喷泉钟指标。三种秒定义更新方案的比较和最终选择还有待进一步技术与实验验证。



来源：中国信息通信研究院更新公开信息整理

图 17 秒定义更新路线图任务完成度

秒定义更新将是一项复杂系统工程。CCTF 还对现有时间频率相关技术、实验和计量的发展提出了相关要求，只有所有的技术目标和计量能力实现后才能完成最终的秒定义更新修改。目前，秒定义更新路线图中各项要求的实现程度各不相同，如图 17 所示。首先，光频标自身精度需要达到指定要求。例如，至少三家机构研制的同一跃迁的光频标，以及至少 3 种不同跃迁的光频标，评定不确定度

不高于 $2e-18$ 。其次，**光频标比对精度满足指定要求**。例如，各国国家可通过移动钟或时频链路方式实现高于 $5e-18$ 精度的频率持续比对。最后，**其他要求**包括新的定义可以实现在未来更加准确的复现，主要国家的计量机构可复现新定义或次级定义，重新定义后实现对时标持续改进，光钟可以实现商品化供应，时频信号传输技术的提升等。未来，不同类型的机构之间的光钟比对，将是秒定义更新的研究重点。

除原子钟以外，核钟也展示出独特优势逐步成为科学研究热点。原子核体积比普通原子小 10 万倍，因此更不易受到环境的影响，但原子核跃迁的频率通常比原子跃迁高出至少 1 万倍，不容易被激发。钷-229 是个例外，仅需 $8.4eV$ 就可以从最低能态（基态）跃迁至某个长寿命的激发态，这一特性启发了基于钷的核钟研究。2023 年，欧洲粒子物理实验室制造出钷-229，首次确定激发能量为 $8.4eV$ 。2024 年 4 月，奥地利维也纳工业大学和德国国家计量研究所（PTB）联合实现了钷-229 核跃迁的首次激光激发¹⁵¹。中科院精密测量院利用动态载入结合缓冲气体碰撞冷却方法实现钷离子的囚禁，同时对钷离子数量、速度分布和囚禁寿命进行分析¹⁵²。9 月，科罗拉多大学博尔德分校、美国 NIST 等联合实现钷-229 核跃迁和铯-87 原子钟的频率比对¹⁵³，测量结果相比以往报道提高了 6 个数量级。核钟研究

¹⁵¹ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.182501>

¹⁵² <https://doi.org/10.1063/5.0202805>

¹⁵³ <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07839-6>

的快速发展，也可能对未来秒定义更新研究产生一定影响。

（四）产业生态构建初具雏形，规模商用仍面临挑战

随着量子精密测量各方向技术研究探索和样机产品研发的不断深化，初创企业及相关配套及应用企业已超过百家，以上游基础材料、核心器件与系统、中游系统样机产品以及下游跨行业应用为组成部分的量子精密测量产业链和产业生态初具雏形。产业生态发展为量子精密测量的商业化进程奠定基础，但要实现大规模商业化应用和产业化发展，还需提升样机产品技术成熟度，实现成本控制，拓展应用场景，增强用户和市场接受度。

产业链上游涵盖核心硬件、辅助器件与保障系统等供应商。核心硬件包括激光器、微波源、探测器、高纯度同位素、原子气室等，辅助器件包括电子元器件、光学系统元件、射频元件以及各种线缆等，保障系统主要用于环境控制，如低温系统、磁屏蔽系统、真空系统、隔振系统等。上游器件装备供应商在欧美地区具有较高的集中度。量子精密测量涉及的基础材料、元器件和支撑系统种类繁多，不同技术路线对上游材料和器件的需求差异较大，这给供应链整合与优化带来挑战。未来，科研单位、高校和企业需加强合作，通过制定技术标准，采用模块化设计思路，推动上游材料和器件标准化生产，提升上下游合作水平，才能有效降低成本，提升集成化水平。

产业链中游的系统设备制造商是将前沿科技成果转化为具有商业价值产品的核心推动力量。当前市场上可商用的量子精密测量设

备种类繁多，涵盖了多个技术方向，原子钟、原子重力仪等相对成熟并进入逐步商业应用；量子磁力计、光量子雷达等正处于工程化研发与实际应用探索的关键阶段，初步形成第一代产品；量子关联成像、里德堡原子天线等尚处于系统技术突破与原型机研发阶段。量子精密测量样机产品在科研仪表、医疗仪器、国防装备等领域展现出巨大应用潜力，有望率先实现产业化突破。

量子时频基准（时钟）是较为成熟技术方向，已实现广泛应用。冷原子钟精度极高，虽然设备结构复杂且体积庞大，但已经在计量、授时、基础科研等领域得到广泛应用。热原子钟则已经广泛应用于通信、电力、卫星导航等领域，其成熟度和商业化程度最高。芯片级相干布局囚禁（CPT）原子钟和分子钟等，体积和成本显著降低，未来有望替代现有高精度晶振，进而改变时频网络体系架构。**量子重力仪**已实现集成化、可移动和自动化控制，未来还需要进一步小型化和降低成本。目前量子重力仪在地质研究和地震预测等领域具有广阔的应用前景。近期中国地震局等单位启动的巨灾防范工程震灾项目计划采购量子绝对重力仪和量子重力梯度仪等产品，目前已有国内供应商产品已通过产品定型测试。**量子磁力计**近年来发展迅速，并且已经衍生出一系列新型测量传感设备，如脑磁图仪、心磁图仪、量子扫描显微镜、量子电流互感器、量子工业探伤仪等。特别是心/脑磁图仪，国内多项相关产品已获得医疗器械注册证，在多家医疗机构开展癫痫诊断、认知障碍评估、脑发育评估等临床应用

研究，并在临床手术中实现辅助病灶定位。**光量子雷达**基于单光子探测技术能够实现高分辨率的成像和测距功能，与传统激光雷达相比具有定位精度高、扫描速度快、人眼安全等优势，填补传统激光雷达能力空白，已经在环境监测、道路交通、气象测绘等领域展现出广阔的应用前景。**量子惯性导航系统和原子天线**在国防领域具有战略价值，近年来其产品成熟度持续提升，逐步在机载、舰载等环境下开展功能验证。

产业链下游涉及基础科研、国防军工、生物医疗、能源开发、工业制造、资源勘探及环境监测等应用领域。量子精密测量技术正成为传统传感测量的有效补充与增强方案，随着性能优化、工程化水平提升及成本降低，有望成为未来传感测量技术演进方向。仍需要看到，部分量子精密测量技术处于实验室研发或原型机阶段，如何有效转化为工程应用并满足实际场景需求仍面临挑战，需产业界与学术界协同突破。此外，量子精密测量技术的商业价值尚未完全显现，社会资本的投入有限，对规模商用形成制约，需加大公共研发资金及创业投资支持力度，推动商业化进程，提升产业化水平。

五、量子信息领域发展与展望

以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息技术，既是量子科技的重要组成部分，也是开辟未来产业新赛道的重要发展方向。当前，量子信息领域进入科技攻关、工程研发、应用探索和产业培育相互带动和一体化发展关键阶段，科研成果亮点不断涌现，

原型机和产品研发进展迅速，示范应用与测试验证广泛开展，技术标准研究取得阶段性成果，市场投融资保持活跃，独角兽企业成为关注热点，产业生态发展方兴未艾。加快量子科学和技术发展，推动应用赋能，增进各方福祉，已成为全人类的共同心愿。2024 年 6 月，为纪念量子力学发展百年，联合国大会宣布 2025 年为国际量子科技年（IYQ）¹⁵⁴，指出量子科技的发展对解决联合国 2030 可持续发展目标所面临的关键挑战具有重大意义，将通过组织系列活动，提高人们对量子科学和技术的重要性的认识与理解。建议我国量子信息科研和产业界借此机会组织开展量子信息技术科普和应用推广活动，积极参与相关国际科技、产业和标准活动的策划组织。

量子计算领域，超导、离子阱、光量子、中性原子和硅半导体等主要技术路线并行发展，样机系统指标持续提升，需要在扩展量子比特规模的同时，实现量子纠错和高精度逻辑门操控。量子纠错是实现容错通用量子计算的必要环节，近年来已成为业界研究热点，新型编码方案研究和实验验证取得诸多重要进展，实现实用化逻辑量子比特操控将是下一个重要里程碑。各类型量子计算软件处于开放探索阶段，欧美企业创新成果丰富发展迅速，未来仍需与硬件系统协同迭代，提升技术成熟度与易用性。量子计算云平台已成为融合软硬件系统能力，支持应用探索和生态培育的核心汇聚点，欧美科技巨头在硬件能力、开源生态和用户吸引力方面占据先发优势。

¹⁵⁴<https://quantum2025.org/en>

量子计算应用场景探索在各领域广泛开展，仍未实现“杀手级”应用，需要量子算法突破。产业生态基本形成，构建量子计算测评体系成为业界关注焦点。

量子通信领域，新型 QKD 和 QRNG 协议研究与系统实验持续开展，性能指标进一步提升，提升系统集成化水平，实现产品提质降本未来主要发展方向。基于卫星实现星地量子通信，提升 QKD 广域组网和灵活应用能力，开展空间量子科学研究已成为重要目标。量子信息网络的协议方案、核心器件、转换接口和组网实验等前沿研究高度活跃，但仍处于开放探索阶段，距离实用化仍有较大差距。量子保密通信技术提升信息安全防护能力具有独特优势，应用场景探索在多个行业和领域持续开展，但规模化部署和商业化应用仍面临一些问题和挑战，业界需进一步凝聚共识，找准方向合力攻关方能突破瓶颈。采用 PQC 已成为应对量子计算信息安全威胁的普遍共识，美国正式发布 PQC 算法标准，大力推动升级迁移。我国需加快制定自主可控算法标准，布局开展产品研发、测试验证与升级迁移等工作。

量子精密测量领域，技术方案多元、应用场景广泛、战略价值突出。微波原子钟等量子时频基准产品已在秒定义、卫星定位导航等领域广泛应用，新一代光学原子钟、核钟研究蓬勃发展，有望进一步提升时间频率计量精度，成为下一代秒定义方案的发展方向。原子干涉磁力仪和重力仪等已有样机产品，在心/脑磁医疗检测、地

质资源勘测等领域开展示范应用。量子陀螺仪和加速度计组成量子惯性导航系统，里德堡原子天线电场测量系统和量子雷达等技术，未来有望在国防军工领域产生重要影响。欧美高度重视量子精密测量技术应用价值，通过科技项目支持、政府合同赠予、技术产品采购等方式，推动技术发展、产品熟化和应用落地。量子精密测量产业链和产业生态初具雏形，要实现大规模商业化应用和产业化发展，需提升样机产品技术成熟度，拓展应用场景，增强用户和市场接受度。

我国量子信息领域发展态势积极向好。未来，在加快关键技术攻关、研发标志性产品、建设基础设施平台、促进产学研用协同、扩展国际交流合作等方面，进一步凝聚共识，聚力加快发展，有望取得更多科研、应用与产业化成果，开辟未来产业新赛道，打造创新发展新动能，为实现中国式现代化提供有力支撑。

附录：量子信息领域国际/国内技术标准

中国信息通信研究院根据标准机构公开信息整理量子信息领域已发布国际标准、国家标准和行业标准，其中不包含在研项目、补编订正、技术报告、研究课题等，统计截至 2024 年 10 月。

（一）国际标准

1. 国际电信联盟电信标准化部门（ITU-T）

表 2 ITU-T 量子信息领域国际标准

No.	标准编号	标准名称
1.	ITU-T Q.4160 (12/2023)	Quantum key distribution networks – Protocol framework
2.	ITU-T Q.4161 (12/2023)	Protocols for Ak interfaces for quantum key distribution networks
3.	ITU-T Q.4162 (12/2023)	Protocols for Kq-1 interfaces for quantum key distribution networks
4.	ITU-T Q.4163 (12/2023)	Protocols for Kx interfaces for quantum key distribution networks
5.	ITU-T Q.4164 (12/2023)	Protocols for Ck interfaces for quantum key distribution networks
6.	ITU-T Y.3800 (10/2019)	Overview on networks supporting quantum key distribution
7.	ITU-T Y.3801 (04/2020)	Functional requirements for quantum key distribution networks
8.	ITU-T Y.3802 (12/2020)	Quantum key distribution networks – Functional architecture
9.	ITU-T Y.3803 (12/2020)	Quantum key distribution networks – Key management
10.	ITU-T Y.3804 (09/2020)	Quantum key distribution networks – Control and management
11.	ITU-T Y.3805 (12/2021)	Quantum key distribution networks – Software-defined networking control
12.	ITU-T Y.3806 (09/2021)	Quantum key distribution networks – Requirements for quality of service assurance
13.	ITU-T Y.3807 (02/2022)	Quantum key distribution networks – Quality of service parameters
14.	ITU-T Y.3808 (09/2024)	Integration of quantum key distribution network and secure storage network
15.	ITU-T Y.3809 (02/2022)	A role-based model in quantum key distribution networks deployment
16.	ITU-T Y.3811 (09/2022)	Quantum key distribution networks – Functional architecture for quality of service assurance
17.	ITU-T Y.3812 (09/2022)	Quantum key distribution networks - Requirements for machine learning based quality of service assurance
18.	ITU-T Y.3814	Quantum key distribution networks – functional requirements and

	(01/2023)	architecture for machine learning enablement
19.	ITU-T Y.3815 (09/2023)	Quantum key distribution networks – Overview of resilience
20.	ITU-T Y.3816 (09/2023)	Quantum key distribution networks – Functional architecture enhancement of machine learning based quality of service assurance
21.	ITU-T Y.3819 (12/2023)	Quantum key distribution networks – Requirements and architectural model for autonomic management and control enablement
22.	ITU-T Y.3821 (04/2024)	Quantum key distribution networks – Requirements for resilience
23.	ITU-T Y.3822 (09/2024)	Quantum key distribution networks - Requirements for autonomic quality of service assurance
24.	ITU-T Y.3824 (09/2024)	Quantum key distribution network federation - Reference models
25.	ITU-T Y.3825 (09/2024)	Integration of quantum key distribution network and time-sensitive network - framework
26.	ITU-T Y.3826 (09/2024)	Integration of quantum key distribution network and user network supporting end-to-end modern cryptography services - framework
27.	ITU-T X.1702 (11/2019)	Quantum noise random number generator architecture
28.	ITU-T X.1710 (10/2020)	Security framework for quantum key distribution networks
29.	ITU-T X.1712 (10/2021)	Security requirements and measures for quantum key distribution networks – key management
30.	ITU-T X.1713 (04/2024)	Security requirements for the protection of quantum key distribution nodes
31.	ITU-T X.1714 (10/2020)	Key combination and confidential key supply for quantum key distribution networks
32.	ITU-T X.1715 (07/2022)	Security requirements and measures for integration of quantum key distribution network and secure storage network

2. 国际标准化组织与国际电工委员会（ISO/IEC）

表 3 ISO/IEC 量子信息领域国际标准

No.	标准编号	标准名称
1.	ISO/IEC 23837-1:2023	Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution Part 1: Requirements
2.	ISO/IEC 23837-2:2023	Security requirements, test and evaluation methods for quantum key distribution Part 2: Evaluation and testing methods
3.	ISO/IEC 4879:2024	Information technology - Quantum computing - Vocabulary

3. 欧洲电信标准化协会（ETSI）

表 4 ETSI 量子信息领域国际标准

No.	标准编号	标准名称
1.	ETSI GR QKD 003 V2.1.1 (2018-03)	Quantum Key Distribution (QKD); Components and Internal Interfaces
2.	ETSI GR QKD 007 V1.1.1 (2018-12)	Quantum Key Distribution (QKD); Vocabulary
3.	ETSI GS QKD 002 V1.1.1 (2010-06)	Quantum Key Distribution (QKD); Use Cases
4.	ETSI GS QKD 003	Quantum Key Distribution (QKD); Components and Internal

	V1.1.1 (2010-12)	Interfaces
5.	ETSI GS QKD 004 V1.1.1 (2010-12)	Quantum Key Distribution (QKD); Application Interface
6.	ETSI GS QKD 004 V2.1.1 (2020-08)	Quantum Key Distribution (QKD); Application Interface
7.	ETSI GS QKD 005 V1.1.1 (2010-12)	Quantum Key Distribution (QKD); Security Proofs
8.	ETSI GS QKD 008 V1.1.1 (2010-12)	Quantum Key Distribution (QKD); QKD Module Security Specification
9.	ETSI GS QKD 011 V1.1.1 (2016-05)	Quantum Key Distribution (QKD); Component characterization: characterizing optical components for QKD systems
10.	ETSI GS QKD 012 V1.1.1 (2019-02)	Quantum Key Distribution (QKD); Device and Communication Channel Parameters for QKD Deployment
11.	ETSI GS QKD 014 V1.1.1 (2019-02)	Quantum Key Distribution (QKD); Protocol and data format of REST-based key delivery API
12.	ETSI GS QKD 015 V1.1.1 (2021-03)	Quantum Key Distribution (QKD); Control Interface for Software Defined Networks
13.	ETSI GS QKD 015 V2.1.1 (2022-04)	Quantum Key Distribution (QKD); Control Interface for Software Defined Networks
14.	ETSI GS QKD 016 V1.1.1 (2023-04)	Quantum Key Distribution (QKD); Common Criteria Protection Profile - Pair of Prepare and Measure Quantum Key Distribution Modules
15.	ETSI GS QKD 016 V2.1.1 (2024-01)	Quantum Key Distribution (QKD); Common Criteria Protection Profile - Pair of Prepare and Measure Quantum Key Distribution Modules
16.	ETSI GS QKD 018 V1.1.1 (2022-04)	Quantum Key Distribution (QKD); Orchestration Interface for Software Defined Networks

（二）国家标准

1. 全国量子计算与测量标准化技术委员会（TC578）

表 5 TC578 量子信息领域国家标准

No.	标准编号	标准名称
1.	GB/T 42565-2023	量子计算 术语和定义
2.	GB/T 43735-2024	量子精密测量中里德堡原子制备方法
3.	GB/T 43736-2024	精密光频测量中光学频率梳性能参数测试方法
4.	GB/T 43737-2024	量子测量术语
5.	GB/T 43740-2024	原子重力仪性能要求和测试方法
6.	GB/T 43784-2024	单光子源性能表征及测量方法
7.	GB/T 43785-2024	光钟性能表征及测量方法
8.	GB/T 43845-2024	基于扫描氮-空位探针的微弱静磁场成像测量方法

2. 全国通信标准化技术委员会（TC485）

表 6 TC485 量子信息领域国家标准

No.	标准编号	标准名称
1.	GB/T 42829-2023	量子保密通信应用基本要求
2.	GB/T 43692-2024	量子通信术语和定义

（三）行业标准

1. 中国通信标准化协会（CCSA）

表 7 CCSA 量子信息领域行业标准

No.	标准编号	标准名称
1.	YD/T 3834.1-2021	量子密钥分发(QKD)系统技术要求 第 1 部分: 基于诱骗态 BB84 协议的 QKD 系统
2.	YD/T 3835.1-2021	量子密钥分发(QKD)系统测试方法 第 1 部分: 基于诱骗态 BB84 协议的 QKD 系统
3.	YD/T 3907.3-2021	基于 BB84 协议的量子密钥分发(QKD)用关键器件和模块 第 3 部分: 量子随机数发生器(QRNG)
4.	YD/T 3907.1-2022	基于 BB84 协议的量子密钥分发(QKD)用关键器件和模块 第 1 部分: 光源
5.	YD/T 3907.2-2022	基于 BB84 协议的量子密钥分发(QKD)用关键器件和模块 第 2 部分: 单光子探测器
6.	YD/T 4301-2023	量子保密通信网络架构
7.	YD/T 4302.1-2023	量子密钥分发(QKD)网络 网络管理技术要求 第 1 部分: 网络管理系统(NMS)功能
8.	YD/T 4303-2023	基于 IPSec 协议的量子保密通信应用设备技术规范
9.	YD/T 3834.2-2023	量子密钥分发(QKD)系统技术要求 第 2 部分: 基于高斯调制相干态协议的 QKD 系统
10.	YD/T 3835.2-2023	量子密钥分发(QKD)系统测试方法 第 2 部分: 基于高斯调制相干态协议的 QKD 系统
11.	YD/T 4410.1-2023	量子密钥分发(QKD)网络 Ak 接口技术要求 第 1 部分: 应用程序接口(API)
12.	YD/T 4632-2023	量子密钥分发与经典光通信共纤传输技术要求
13.	YD/T 3907.4-2024	基于 BB84 协议的量子密钥分发(QKD)用关键器件和模块 第 4 部分: 诱骗态调制模块

2. 密码行业标准化技术委员会（CSTC）

表 8 CSTC 量子信息领域行业标准

No.	标准编号	标准名称
1.	GM/T 0108-2021	诱骗态 BB84 量子密钥分配产品技术规范
2.	GM/T 0114-2021	诱骗态 BB84 量子密钥分配产品检测规范

3. 电力行业信息标准化技术委员会（DL/TC27）

表 9 DL/TC27 量子信息领域行业标准

No.	标准编号	标准名称
1.	DL/T 2399-2021	电力量子保密通信系统密钥交互接口技术规范

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62300592

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn

